



Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN
EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS**

ALUMNO: JESÚS PAVÓN DE LA TORRE

TUTOR: JORGE LÓPEZ PUENTE

Leganés, Septiembre 2015


RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se estudia el comportamiento a impacto de un material compuesto de fibra de carbono con matriz epoxi, concretamente un laminado de cita AS4/8552. La modelización se produce para un rango de velocidades de impacto entre 60 m/s y 500 m/s.

El laminado se compone de una superficie cuadrada de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ con un espesor de 3,104 mm, compuesto de 16 láminas con una interacción de material cohesivo a la mitad del mismo, quedando 8 láminas con una secuencia de apilamiento y 8 láminas simétricas a la primera placa de material compuesto.


Se han realizado 6 modelizaciones con orientaciones y secuencias de apilamiento de las láminas diferentes, obteniendo diversos resultados, los cuales se compararan entre sí.

La modelización numérica se ha desarrollado con el software de elementos finitos Abaqus, el cual será explicado con detalle más adelante.


Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INDICE	

INDICE

1. CAPITULO 1	6
1.1. MOTIVACIÓN	7
1.2. OBJETIVOS	8
1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	8
2. CAPITULO 2	9
2.1. MATERIALES COMPUESTOS	10
2.1.1. Definición y clasificación	10
2.1.2. Clasificación de fibras	13
2.1.3. Clasificación de las matrices	15
2.1.4. Aplicación de los materiales compuestos	16
2.2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEBIDO A IMPACTOS	17
2.2.1. Impactos de baja velocidad	18
2.2.2. Impacto de alta velocidad	19
2.3. ENSAYOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA	21
2.3.1. Modos de fallo	21
2.3.2. Técnicas de inspección	21
2.4. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA AL DAÑO EMPÍRICOS Y ANALÍTICOS	24
2.4.1. Modelos empíricos	24
2.4.2. Modelos semiempíricos	24
2.4.3. Modelos analíticos	25
2.5. MODELOS NUMÉRICOS	26
2.5.1. Modelos de fallo de materiales compuestos	26
2.5.2. Modelos cohesivos	30

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INDICE	

3. CAPITULO 3	33
3.1. SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS: ABAQUS	34
3.2. MODELOS DESARROLLADOS	34
3.3. MODELIZACIÓN	35
3.3.1. Disposición de las partes	35
3.3.2. Propiedades de las partes	36
3.3.3. Interacciones	42
3.3.4. Condiciones de contorno y cargas aplicadas.....	42
3.3.5. Mallado de las partes	43
4. CAPITULO 4	46
4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	47
4.2. VELOCIDAD RESIDUAL	47
4.3. ÁREA DAÑADA.....	49
4.4. MODOS DE DAÑO.....	55
4.5. ENERGÍA ABSORBIDA	60
4.6. COMPARACIÓN CON MODELOS EXPERIMENTALES	60
5. CAPITULO 5	63
5.1. PRESUPUESTO	64
6. CAPITULO 6	65
6.1. TRABAJOS FUTUROS.....	66
6.2. CONCLUSIONES	67
ANEXOS	68
REFERENCIAS	75

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INDICE	

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. COMPOSICIÓN DEL AIRBUS 350 XWB	7
FIGURA 2.1. LEY TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LA FIBRA, LA MATRIZ Y EL MATERIAL COMPUESTO. A) LA FIBRA POSEE UNA DEFORMACIÓN DE ROTURA INFERIOR A LA MATRIZ B) LA MATRIZ POSEE UNA DEFORMACIÓN DE ROTURA INFERIOR A LA FIBRA	10
FIGURA 2.2. ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH	11
FIGURA 2.3. LAMINADO UNIDIRECCIONAL	12
FIGURA 2.4. LAMINADO ORTÓTROPO	12
FIGURA 2.5. LAMINADO CUASI-ISÓTROPO	12
FIGURA 2.6. LAMINADO DE TEJIDO.....	13
FIGURA 2. 7. EVOLUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA	17
FIGURA 2. 8. A) FISURA EN LA CAPA SUPERIOR. B) FISURA EN LA CAPA INTERMEDIA C) GRIETA DE FLEXIÓN EN LA CAPA INFERIOR.....	18
FIGURA 2. 9. DELAMINACIÓN.....	19
FIGURA 2. 10. PROBABILIDAD DEL LÍMITE BALÍSTICO.	20
FIGURA 2. 11. MODO DE FALLO.	20
FIGURA 2. 12. TIPOS DE FALLO.....	21
FIGURA 2. 13. GRIETA EN EJE DE TRANSMISIÓN.	22
FIGURA 2. 14. RADIOGRAFÍA DE LA FALTA DE PENETRACIÓN DEL MATERIAL EN UNA SOLDADURA.....	22
FIGURA 2. 15. INSPECCIÓN POR TERMOGRAFÍA.....	23
FIGURA 2. 16. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS.	23
FIGURA 2. 17. MODELO DE IMPACTO DE MASA-MUELLE.....	24
FIGURA 2. 18. MECANISMOS DE FALLO.....	27
FIGURA 2. 19. LEY TRACCIÓN-SEPARACIÓN DE UN MATERIAL COHESIVO.....	30
FIGURA 2. 20. LEY DE PROPAGACIÓN DE LA FISURA.....	30
FIGURA 2. 21. MODOS DE CARGA.....	31
FIGURA 2. 22. MODELOS CONSTITUTIVOS.	32
FIGURA 3. 1. DISPOSICIÓN DE LAS PARTES.	36
FIGURA 3. 2. LEY DE EVOLUCIÓN LINEAL DE ENERGÍA DEL DAÑO.	38



Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INDICE DE FIGURAS	

FIGURA 3. 3. VISUALIZACIÓN DEL TIE.....	42
FIGURA 3. 4. CARGA DINÁMICA EN EL PROYECTIL.	42
FIGURA 3. 5. MALLA DE TIPO CONTINUUM SHELL.	43
FIGURA 3. 6. MALLA DE TIPO COHESIVE.	44
FIGURA 3. 7. MALLA DE TIPO 3D STRESS.	44
FIGURA 3. 8. MALLADO DEL MODELO NUMÉRICO.....	45
FIGURA 4. 1. CURVA VELOCIDAD RESIDUAL - VELOCIDAD INICIAL DE CADA MODELO NUMÉRICO.	48
FIGURA 4. 2. AREA DAÑADA. A) 200 M/S B) 267 M/S C) 500 M/S.	50
FIGURA 4. 3. CURVA ÁREA DAÑADA – VELOCIDAD INICIAL DE LOS MODELOS CUASI-ISÓTROPOS Y EL MODELO 6.....	51
FIGURA 4. 4. CURVA ÁREA DAÑADA – VELOCIDAD INICIAL DEL MODELO 3 Y EL MODELO 4.....	52
FIGURA 4. 5. DEGRADACIÓN DEL COHESIVO DEL MODELO 3.....	53
FIGURA 4. 6. DEGRADACIÓN DEL COHESIVO DEL MODELO 1.....	54
FIGURA 4. 7. DEGRADACIÓN DEL COHESIVO DEL MODELO 4.....	54
FIGURA 4. 8. DAÑO EN EL MODELO 1 A UNA VELOCIDAD DE IMPACTO DE 267 M/S.	56
FIGURA 4. 9. DAÑO EN EL MODELO 3 A UNA VELOCIDAD DE IMPACTO DE 311 M/S.	57
FIGURA 4. 10. DAÑO EN EL MODELO 4 A UNA VELOCIDAD DE IMPACTO DE 300 M/S.	58
FIGURA 4. 11. COMPORTAMIENTO A IMPACTO DEL LAMINADO DEL MODELO 1.	59
FIGURA 4. 12. COMPORTAMIENTO A IMPACTO DEL LAMINADO DEL MODELO 3.	59
FIGURA 4. 13. COMPARATIVA DE LAS CURVAS ENERGÍA RESIDUAL - ENERGÍA INICIAL DE LOS MODELOS. 60	
FIGURA 4. 14. CURVA VELOCIDAD RESIDUAL - VELOCIDAD INICIAL DEL MODELO EXPERIMENTAL.	61
FIGURA 4. 15. CURVA ÁREA DAÑADA – VELOCIDAD INICIAL DEL MODELO EXPERIMENTAL.	61
FIGURA 4. 16. COMPOSICIÓN DE LA PROPUESTA DE LAMINADO.	62
FIGURA 4. 17. ÁREA DAÑADA A 500 M /S. A) MODELO EXPERIMENTAL B) MODELO 1.	62

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INDICE DE TABLAS	


INDICE DE TABLAS

TABLA 2. 1. TIPOS DE FIBRAS	13
TABLA 2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FIBRA	14
TABLA 2. 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS RESINAS.	16
TABLA 3. 1. PROPIEDADES DE CINTA AS4/8552.	36
TABLA 3. 2. PROPIEDADES DE LA EVOLUCIÓN DEL DAÑO.	39
TABLA 3. 3. DISTRIBUCIÓN DEL LAMINADO.	39
TABLA 3. 4. PROPIEDADES DEL COHESIVO.	40
TABLA 3. 5. PROPIEDADES DEL PROYECTIL.....	41
TABLA 3. 6. ELEMENTOS DE CADA PARTE.....	45
TABLA 4. 1. LÍMITE BALÍSTICO DE CADA MODELO NUMÉRICO.	49
TABLA 4. 2. VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL A UNA VELOCIDAD INICIAL DE 500 m/s.....	49
TABLA 4. 3. ÁREA MÁXIMA DAÑADA.	50
TABLA 5. 1. PRESUPUESTO.	64
ANEXO 1. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 1.....	69
ANEXO 2. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 2.....	70
ANEXO 3. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 3.....	71
ANEXO 4. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 4.....	72
ANEXO 5. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 5.....	73
ANEXO 6. VELOCIDAD RESIDUAL DEL MODELO 6.....	74



CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INTRODUCCIÓN	

1.1. MOTIVACIÓN

El análisis de elementos estructurales sometidos a diferentes solicitaciones, permite obtener materiales cada vez más sofisticados. Es por ello, que se necesita analizar la composición de los materiales y realizar estudios que permitan determinar la fiabilidad del elemento al encontrarse sometido a diferentes cargas.

En los últimos años, el desarrollo de los materiales compuestos se ha incrementado debido a su bajo peso y sus buenas propiedades mecánicas, dando lugar a un importante ahorro económico en sector aeronáutico donde se están fabricando aviones de más de un 50% de la estructura de material compuesto (Figura 1.1).

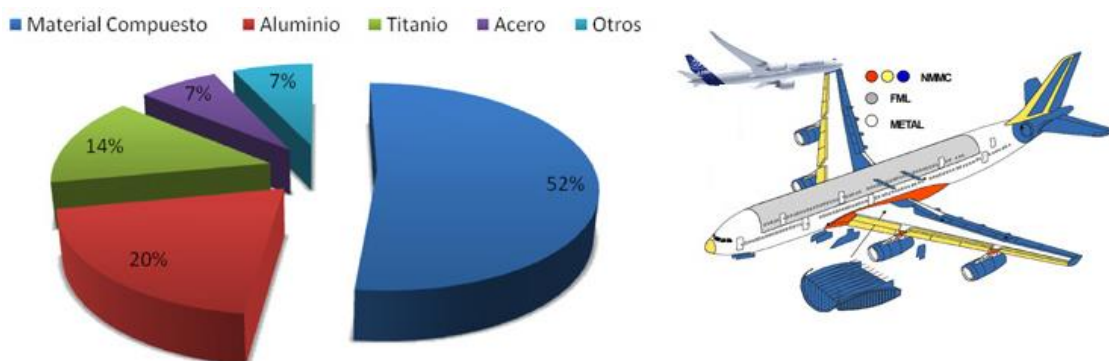



Figura 1.1. Composición del Airbus 350 XWB

El uso de materiales compuestos se ha extendido a otras industrias en menor medida, ya que la fabricación de estos materiales es costosa y únicamente sería rentable en aplicaciones donde no hubiera alternativa al uso de otro material.

Existen varios estudios sobre estos materiales, aunque en algunos casos se desconoce su comportamiento. Este trabajo se centra en el impacto a alta velocidad sobre un material compuesto, puesto que la respuesta de las estructuras sometidas a este estudio son poco conocidas y un fallo de ésta puede provocar una situación catastrófica.

Por lo tanto, la motivación principal se basa en el estudio del comportamiento de un material compuesto sometido a impacto, realizando un modelo que se asemeje a la realidad y así poder ahorrar una gran cantidad de costes y tiempo computacional en futuros ensayos de impacto.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	INTRODUCCIÓN	

1.2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo conocer el comportamiento de los materiales compuestos bajo impacto, así como la influencia de la secuencia de apilamiento de las láminas del material compuesto.

Mediante un modelo numérico se determinará el comportamiento del laminado frente a impacto a diferentes velocidades y se obtendrán los resultados típicos de este ensayo, es decir, la velocidad residual y el área dañada.

El principal objetivo de este trabajo es comparar como varían los resultados de límite balístico y el área dañada para diferentes laminados, los cuales se componen de láminas con diferentes orientaciones y secuencias de apilamiento.

También se estudiará el daño que se produce tras la perforación del impacto del proyectil para diferentes modelos variando la orientación y la secuencia de apilamiento de las láminas del material compuesto.

Por último, se estudiará la energía que absorbe cada uno de los laminados propuestos en el impacto.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Este Trabajo se ha dividido en 6 capítulos diferentes, que se detallan a continuación:


- **Capítulo 1.** Describe los objetivos que se pretenden con este trabajo y la motivación por la cual se ha realizado.
- **Capítulo 2.** Se describen los conceptos y estudios anteriores sobre el campo de los materiales compuestos.
- **Capítulo 3.** Se describe el modelo numérico.
- **Capítulo 4.** Se detallan los resultados obtenidos y se realiza una comparación entre los diferentes modelos estudiados.
- **Capítulo 5.** Se presenta un estudio económico del Trabajo.
- **Capítulo 6.** Se realizan las conclusiones y posibles propuestas futuras del Trabajo.
- Anexos de las velocidades residuales de cada modelo numérico.
- Se incluye la bibliografía utilizada en el Trabajo.



CAPITULO 2

ANTECEDENTES



Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.1. MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es aquel elemento formado por dos o más componentes, en el que las propiedades del material resultante sean mejores que las de los componentes por separado.

2.1.1. Definición y clasificación

Generalmente, el material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. Ambos se combinan para dar lugar a un único material con mejores propiedades (Figura 2.1). Además existen aditivos que se pueden introducir en el proceso de fabricación para mejorar algunas propiedades específicas del material compuesto.

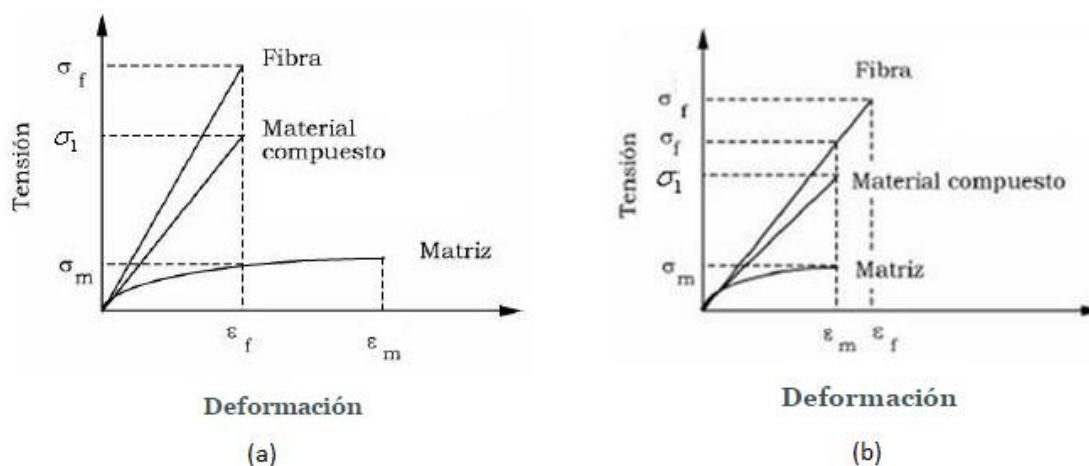



Figura 2.1. Ley tensión-deformación de la fibra, la matriz y el material compuesto.

a) La fibra posee una deformación de rotura inferior a la matriz b) La matriz posee una deformación de rotura inferior a la fibra

- La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Tiene como función aportar la resistencia mecánica, rigidez y dureza propias de este material. Las fibras más utilizadas son las de aramida, vidrio y carbono, ya que poseen gran resistencia a la tracción [4] [5].
- La matriz se encarga de transmitir las cargas al refuerzo, además de mantenerlas en la posición correcta y proteger de posibles daños en la manufactura y uso. También es el elemento que define las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y la exposición a elevadas temperaturas. Las matrices pueden ser de materiales cerámicos, materiales metálicos o materiales poliméricos, siendo estos últimos los más comúnmente utilizados [4] [5].

De acuerdo a la forma del refuerzo, se clasifican los materiales compuestos de la siguiente manera:

- Materiales compuestos reforzados con partículas. A su vez estos materiales se dividen en materiales reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión. Los compuestos consolidados por dispersión se determinan según el tamaño del diámetro de las partículas, comprendido entre 10 – 250 nm. Los compuestos particulados grandes están diseñados para producir una combinación de propiedades poco usuales.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

- Materiales compuestos reforzados con fibras. Estos compuestos consiguen una mejor resistencia a la fatiga, además de una mejor relación resistencia-peso y rigidez. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras las cuales soportan la mayor parte de la carga.
- Materiales compuestos estructurales. Están formados por compuestos de materiales sencillos donde sus propiedades dependen de la geometría y diseño final. Los más abundantes son los laminares y los paneles sándwich.

➤ Paneles de tipo Sándwich

Consisten en dos láminas exteriores de elevada dureza y resistencia, frecuentemente plásticos reforzados con aluminio, separadas por un material menos denso y resistente, comúnmente espumas poliméricas o cuchos sintéticos (Figura 2.2).

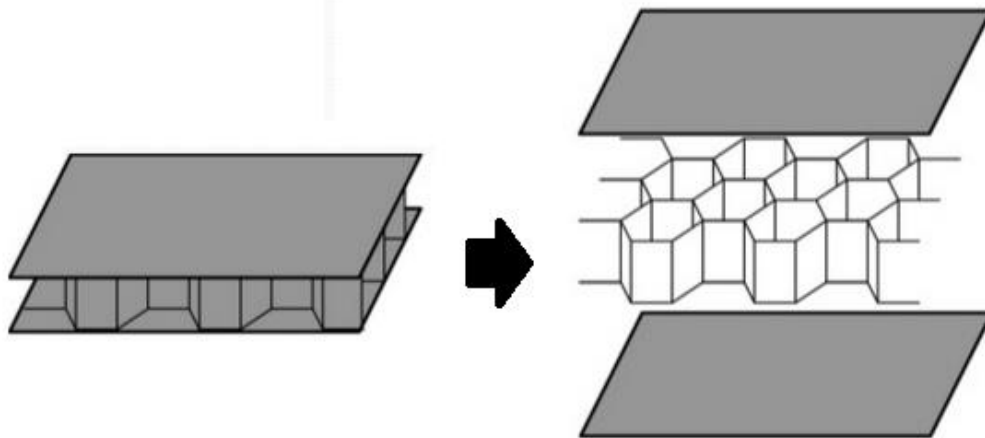



Figura 2.2. Estructura tipo Sándwich

➤ Laminados

Los laminados son una consecución de láminas apiladas, de las cuales, cada una de ellas es una capa de resina de pequeño espesor reforzada con fibras. Hay dos tipos de láminas: de cinta o de tejido.

Hay diferentes orientaciones de dichas láminas, lo que proporcionan diferentes características para cada tipo de laminado, siendo la orientación la propiedad más importante.

- Laminado unidireccional. La característica principal de este tipo de laminado es que todas las fibras se encuentran orientadas en una misma y única dirección. Por lo tanto, este laminado presenta isotropía transversal, es decir, las mismas propiedades en direcciones perpendiculares a la fibra (Figura 2.3).

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

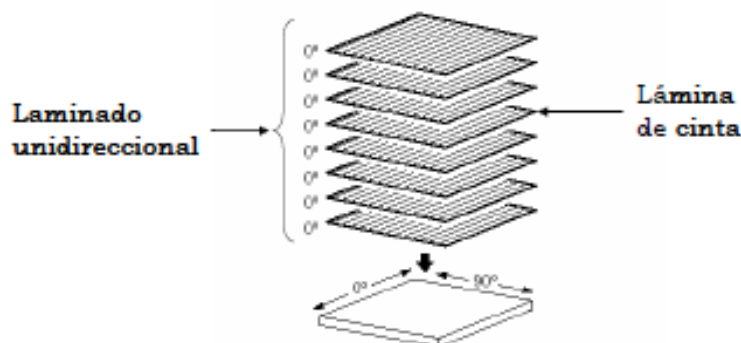


Figura 2.3. Laminado unidireccional

- Laminado ortótropo. Se realiza el apilamiento de las láminas en dos direcciones perpendiculares entre sí, consiguiendo de esta manera un comportamiento ortótropo, con diferentes propiedades según la dirección (Figura 2.4).

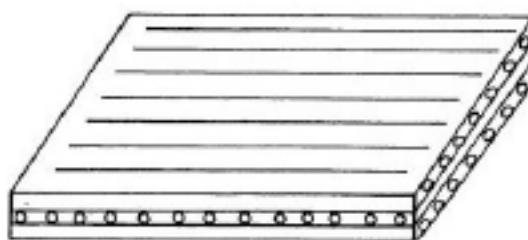


Figura 2.4. Laminado ortótropo

- Laminado cuasi-isótopos. Se fabrican mediante un apilamiento de láminas de cinta que están orientadas en diferentes direcciones (0° , 90° y $\pm 45^\circ$). Su característica principal es que tiene las mismas propiedades en todas las direcciones debido a las diferentes orientaciones de cada lámina (Figura 2.5).

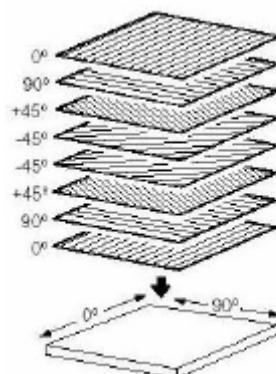



Figura 2.5. Laminado cuasi-isótropo

- Laminado de tejido. Estos laminados tienen la característica de seguir una secuencia de enlazado, normalmente en direcciones perpendiculares entre sí, obteniendo así una forma de tejido (Figura 2.6). Poseen uniformidad de las propiedades mecánicas en 0° y 90° .

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

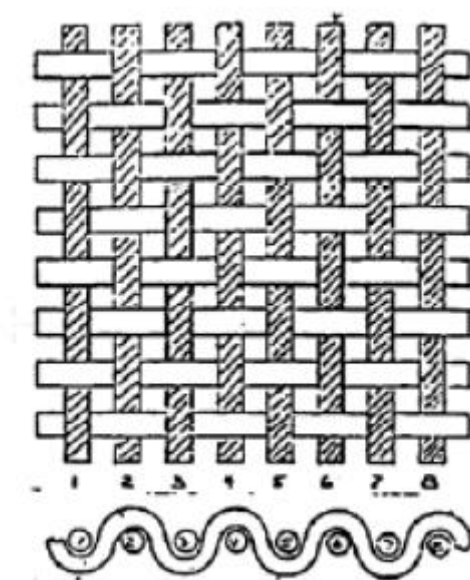


Figura 2.6. Laminado de tejido

2.1.2. Clasificación de fibras

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto, es el que aporta la resistencia mecánica, rigidez y dureza. En la Tabla se muestran los tipos de fibras.


FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)

Tabla 2. 1. Tipos de fibras

Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en aplicaciones industriales debido a sus buenas propiedades mecánicas, su alta disponibilidad y su reducido coste. Las propiedades características de este tipo de refuerzo son las siguientes:

- Alta resistencia mecánica.
- Es un material incombustible, es decir, no arde a la exposición de una llama.
- Excelente estabilidad dimensional debido a que posee un bajo coeficiente de dilatación térmica. Además, es poco sensible a los cambios térmicos.
- Baja conductividad térmica, lo que hace al material un excelente aislante térmico.
- Es biológicamente inerte, por lo tanto, no se deteriora y no sufre alteraciones.
- Presenta una excelente resistencia a una variedad de agentes químicos.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

Hay diferentes tipos de fibras de vidrio, entre las más utilizadas se encuentra el vidrio E, abarcando un 90% de mercado. Este tipo de fibra de vidrio se caracteriza por su composición de borosilicato de aluminio con una baja proporción de óxidos alcalinos que le aporta buenas propiedades aislantes. Las variedades de vidrio R y vidrio S se caracterizan por una mejor resistencia al resto de su clase, debido a que es un vidrio de silicato de aluminio. A diferencia de los otros tipos de vidrio, el vidrio ECR presenta alta resistencia a ácidos, además de buenas propiedades mecánicas. En la Tabla 2.1 se expone la composición detallada de los tipos de fibra citados anteriormente.

Óxidos	Óxidos en % en masa			
	Vidrio E	Vidrio R	Vidrio S	Vidrio ECR
Silice (SiO ₂)	55	60	64,7	58,4
Alúmina (Al ₂ O ₃)	14	24,4	25	11,1
Óxido de titanio (TiO ₂)	0,2	-	-	2,4
Óxido de boro (B ₂ O ₃)	7	-	-	-
Cal (CaO)	22	9	-	21,4
Óxido de magnesio (MgO)	1	6	10	2,7
Óxido de cinc (ZnO)	-	-	-	2,7
Óxido de sodio (Na ₂ O)	0,5	0,5	0,3	0,8
Óxido de potasio (K ₂ O)	0,3	0,1	-	0,1

Tabla 2.2. Composición química de los diferentes tipos de fibra


Fibra de carbono

Para aplicaciones en las que la fibra de vidrio tiene unas propiedades mecánicas insuficientes, es necesario utilizar fibras de carbono. Por lo tanto, el uso de la fibra de carbono se utiliza ampliamente en aplicaciones estructurales donde se requiere alta resistencia a la fatiga o en situaciones en las que se necesita un buen comportamiento mecánico bajo condiciones estáticas.

La fibra de carbono es menos utilizada que la fibra de vidrio debido a que el coste de fabricación es más elevado, aunque su uso va aumentando en industrias como la aeronáutica, automoción, aplicaciones deportivas, marina, etc.

Las principales características de la fibra de carbono son:

- Baja densidad.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica, por lo tanto, no presenta cambios dimensionales.
- Presenta estabilidad química y posee una alta resistencia a la abrasión.
- Alta resistencia a la fatiga y buena conductividad térmica.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

Hay diferentes tipos de fibra de carbono, que éstas se clasifican según la temperatura del tratamiento de calentamiento:

- ✓ La fibra de carbono de alto módulo (HM) destaca por tener gran rigidez, además de necesitar la mayor temperatura en el tratamiento para ser procesada.
- ✓ La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que le proporciona la mayor resistencia a la tracción.
- ✓ La fibra de carbono (III) tiene una rigidez menor al resto y por ello su precio es más económico debido a que la temperatura de tratamiento es la más baja.

Fibra orgánica

Existen fibras obtenidas a partir de polímeros completamente alineados que se basan en la alta resistencia y rigidez. La fibra orgánica que domina el mercado es la Kevlar. De esta fibra destacan dos formas: Kevlar 29 y Kevlar 49. La fibra Kevlar 29 posee una alta resistencia y un módulo elástico intermedio, mientras que la fibra Kevlar 49 tiene un módulo elástico superior pero la misma resistencia que la fibra Kevlar 29.

2.1.3. Clasificación de las matrices

En la industria se utilizan normalmente dos tipos de matrices poliméricas: polímeros termoplásticos y polímeros termoestables. Los termoplásticos al someterse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, lo que permite moldear el material con la forma deseada. Mientras que los polímeros termoestables al estar sometidos a altas temperaturas se produce la descomposición química, es decir, la carbonización del polímero.

En general, las resinas termoestables se combinan con diferentes tipos de refuerzos para aumentar las características mecánicas del material. Las resinas más comunes son: resina poliéster, resina viniléster, resina epoxi y resina fenólica.

Resina poliéster


Se obtienen a partir de reacciones de condensación entre dos monómeros, un alcohol (diol) y un poliácido (ácido dicarboxílico). Las resinas de poliéster se caracterizan por sus buenas propiedades mecánicas y un buen comportamiento eléctrico, además, son productos de bajo coste.

En general, es la resina más utilizada en moldeo por contacto y por proyección, siendo usada ampliamente en industrias como la naval y de transporte.

Resina viniléster

Las resinas viniléster reúnen las mejores propiedades de las resinas epoxi y las resinas poliéster. Estas resinas son producidas a partir de una reacción entre una resina epoxi y un ácido acrílico. Algunas propiedades características de este tipo de resinas son:

- Buenas propiedades mecánicas.
- Buena maleabilidad debido a su excelente fluidez.
- Resistente a la corrosión y a altas temperaturas.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

El uso de esta resina se ha incrementado en los últimos años, a pesar de tener un coste del orden de 1,5 a 2 veces superior a las resinas poliéster.

Resina epoxi

Las resinas epoxi se basan generalmente en bisfenol A que endurecen por poliadición al reaccionar con endurecedores como aminas, fenoles y poliácidos. El tipo de epóxido y endurecedor influyen en las características finales de la resina. Las características de este tipo de resinas son las siguientes:

- Buenas propiedades mecánicas.
- Gran resistencia térmica y estabilidad térmica.
- Buena adherencia a la fibra de refuerzo.
- Estabilidad química.

Las resinas epoxi son las más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad ya que poseen mejores propiedades mecánicas que las resinas de poliéster y de viniléster. Su uso es frecuente en estructuras que requieren máxima resistencia con el mínimo peso.

Resina fenólica

Las resinas fenólicas se obtienen mediante una reacción de condensación entre un grupo fenólico (cresoles, p-fenilfenol y octilfenol) con un formaldehído. Estas resinas poseen las siguientes propiedades:

- Resistencia al fuego.
- Alta estabilidad térmica.
- Buena resistencia química.

Se utilizan para la fabricación de accesorios de instalaciones y para interiores de transporte colectivos como trenes o aviones.


En la Tabla 2.3 se comparan las principales características mecánicas de las resinas.

Resina	Densidad	Resistencia a tracción	Módulo elástico	Volumen de contracción	Alargamiento a la rotura	Temperatura de utilización
Poliéster	1,22	60 - 85	4,2 - 4,8	7 - 9 %	2,5 %	60 - 130
Viniléster	1,12	81	3,3 - 3,5	6 - 7 %	6 %	100 - 140
Epoxi	1,1	90	7	1 %	1,5 %	60 - 200
Fenol	1,25	41 - 62	6,2 - 9	1 - 3 %	2,5 %	100 - 230

Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas de las resinas.

2.1.4. Aplicación de los materiales compuestos

El uso de los materiales compuestos tuvo lugar en el Antiguo Egipto, utilizándose la fibra de vidrio como refuerzo de vasos y ánforas. A partir del siglo XVIII se empezaron a crear los primeros tejidos, pero no fue hasta el siglo XX cuando se produjo el auge de los materiales compuestos y se comenzó a desarrollar.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

En la actualidad el uso de los materiales compuestos se ha incrementado debido a las necesidades de reducir peso en las estructuras convencionales. Debido al alto coste de la materia prima y del proceso de fabricación su uso en aplicaciones donde no hay restricciones económicas.

En la industria aeronáutica, el uso de los materiales compuestos se ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas (Figura 2.7), donde actualmente se han fabricado aviones, el Airbus A350 XWB y el Boeing 787, con más de un 50% de la estructura de material compuesto.

Otras aplicaciones de los materiales compuestos se están implantando en la industria energética y automoción.

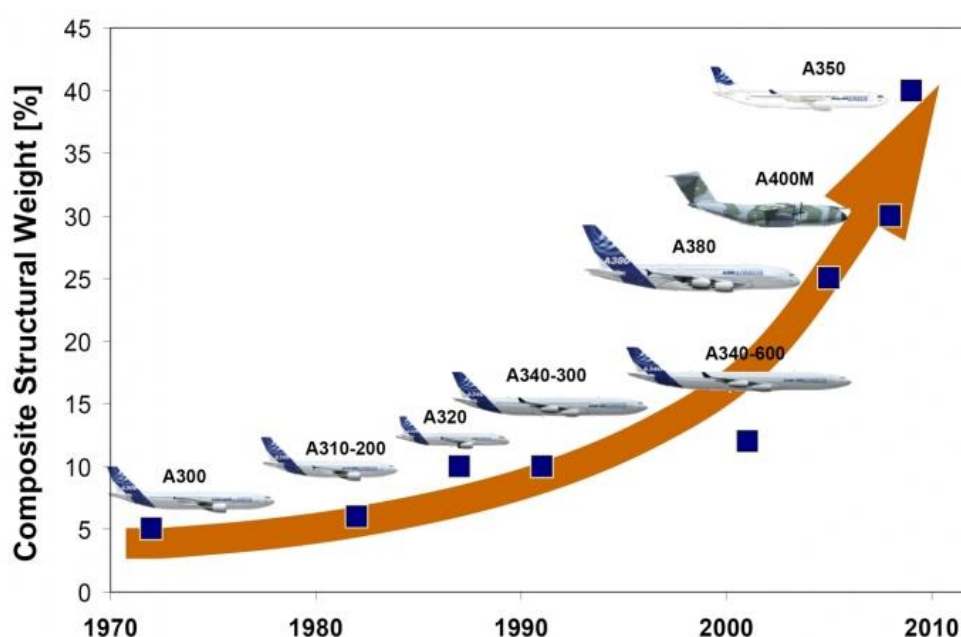



Figura 2. 7. Evolución de los materiales compuestos en la industria aeronáutica

2.2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEBIDO A IMPACTOS

Los materiales compuestos tienen buenas propiedades mecánicas, sin embargo, durante la vida en servicio de elementos fabricados con estos materiales puede encontrarse sometidos a impacto. Estos impactos son motivo de preocupación, ya que el daño producido puede reducir las propiedades de la estructura de forma significativa. En general, se pueden clasificar los impactos dependiendo de la velocidad del proyectil en: alta velocidad y baja velocidad.

Para comprender el efecto de los impactos, se desarrollan análisis experimentales que mediante ensayos dinámicos se pretende simular situaciones reales a las que puede estar sometida la estructura. Normalmente, se analizan elementos simples que representan la estructura, aunque para algunas situaciones extremas se estudia la estructura completa.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.2.1. Impactos de baja velocidad

Los impactos de baja velocidad pueden ser una causa de riesgo en la funcionalidad de la estructura, ya que reduce considerablemente las propiedades del material compuesto. Esto es debido a la duración del impacto, donde se producen ondas de tensión que se propagan hasta los bordes libres de la estructura y estas pueden ser reflejadas durante el proceso de impacto. En primera instancia estas ondas son de compresión y el laminado trabaja correctamente, pero cuando las ondas son reflejadas se produce la tracción de las fibras, y por lo tanto, tiende a producirse la deslaminación y el fallo de la estructura.

Los impactos de baja velocidad de producen por el golpe de un objeto de masa considerable contra el material, también, pueden presentarse impactos durante el proceso de manufactura. Para determinar el comportamiento del material frente a impacto a baja velocidad se han desarrollado diversos ensayos experimentales. En general se utilizan la torre de caída y el péndulo de Charpy. Algunos estudios realizados de estos ensayos son los realizados por Cantwell y Morton [9] y Hosseinzadeh et al. [10].

En los impactos de baja velocidad sobre materiales compuestos se presentan tres modos de fallo: rotura de la matriz, deslaminación y rotura de la fibra.

Rotura de la matriz

El primer fallo que se produce en materiales compuestos expuestos a impactos a baja velocidad es la rotura de la matriz. Debido a la concentración de tensiones producida por el proyectil se produce una fisura que se propaga por la matriz.

Las grietas de la matriz en las capas superiores (Figura 2.8a) y la capa media (Figura 2.8b) comienzan bajo los bordes del impactador. Estas grietas se producen por la alta tensión de corte transversal a través del matriz. Los esfuerzos cortantes transversales están relacionados con la fuerza de contacto y el área de contacto. Por otro lado, la grieta en la capa inferior (Figura 2.8c) se denomina grieta de flexión, ya que es producida por altas tensiones de tracción y de flexión.

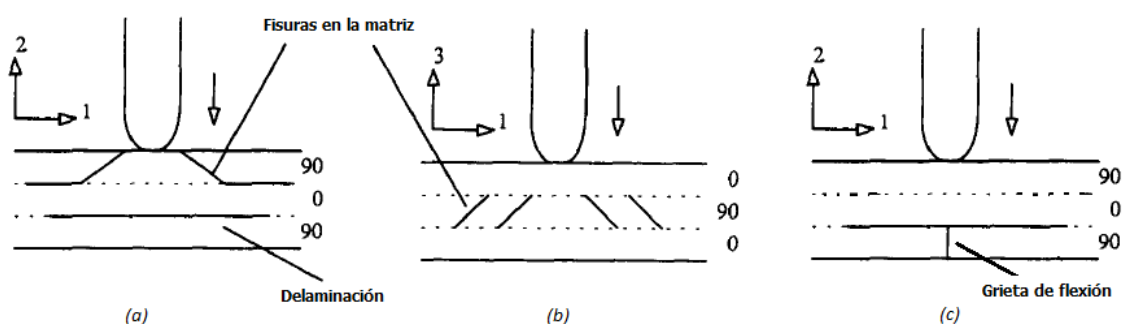



Figura 2. 8. a) Fisura en la capa superior b) Fisura en la capa intermedia c) Grieta de flexión en la capa inferior

Delaminación

La delaminación se produce cuando una grieta se extiende a través de la matriz y produce el despegue de entre láminas adyacentes. Se ha demostrado experimentalmente que la delaminación tiene lugar entre principalmente láminas con diferentes orientaciones [11].

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

La forma y el tamaño del área delaminada (Figura 2.9) depende de tres factores: la diferencia en los módulos de elasticidad en las direcciones longitudinal y transversal de cada lámina, el espesor de la lámina y la deflexión del laminado.

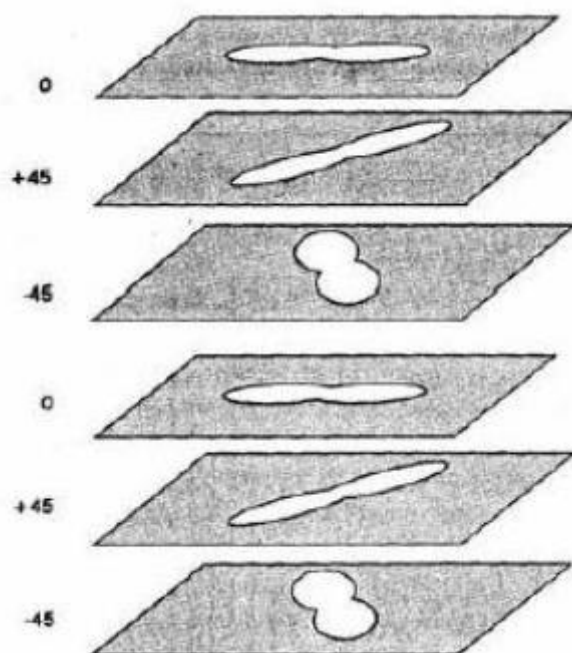


Figura 2. 9. Delaminación

Rotura de las fibras


La rotura de las fibras se produce generalmente después del proceso de fractura de agrietamiento de la matriz y la delaminación. El fallo de la fibra se produce bajo el impactador debido a los altos esfuerzos y los efectos de indentación y en la cara no impactada debido a los esfuerzos de flexión.

2.2.2. Impacto de alta velocidad

En los impactos de alta velocidad, el comportamiento del material compuesto dependerá de su estructura y las propiedades mecánicas del proyectil, además, de las condiciones de impacto, la configuración del laminado y la geometría tanto del proyectil como de la placa.

En un impacto de alta velocidad deben considerarse los efectos inerciales y la propagación de ondas de tensión en el sólido producidas por la impacto entre el proyectil y el blanco. Debido a que no existe una situación de equilibrio, algunas zonas de la estructura impactada pueden estar sometidas a estados tensionales diferentes.

Los ensayos de alta velocidad tratan de simular, mediante un cañón de gas lanzando un proyectil de una masa pequeña, una situación real como el caso de una colisión de un pedazo de hielo que se despega de la estructura del avión y golpea contra el fuselaje del mismo. Las características principales a estudiar en este tipo de ensayos son: el límite balístico, la velocidad residual, la energía de perforación y el modo de fallo.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

Velocidad residual

La velocidad residual es la velocidad que tiene el proyectil cuando ha atravesado el elemento de ensayo. Experimentalmente, se ha demostrado que a mayor velocidad de impacto la velocidad residual es mayor. Además, con la velocidad residual es posible determinar la energía absorbida en el impacto por el elemento.

Límite Balístico

El límite balístico es la velocidad por debajo de la cual un proyectil no perfora la estructura impactada. Generalmente, el límite balístico se expresa en términos de probabilidad como V_{50} (Figura 2.10), lo que indica que existe un 50% de probabilidad de perforación.

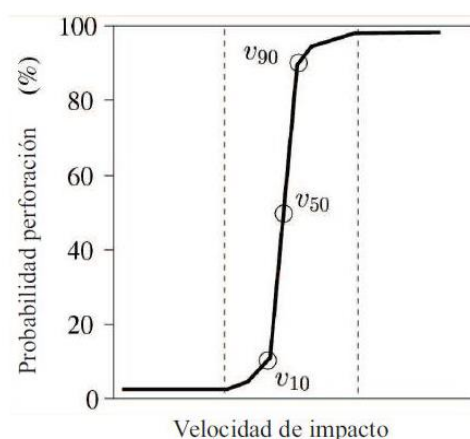


Figura 2. 10. Probabilidad del límite balístico.

Energía de perforación

La energía de perforación es la energía mínima necesaria para perforar un elemento cuando se realiza un impacto a alta velocidad. Experimentalmente, se calcula con la velocidad de impacto más baja que consigue atravesar el laminado de material compuesto. Esta velocidad depende de la forma del proyectil y del espesor del laminado ensayado.

Modo de fallo

Por consiguiente, otro aspecto estudiado es el modo de fallo de los materiales compuestos. De forma general, el fallo de los materiales compuestos se produce cerca de la zona de impacto. En los materiales compuestos de fibra de carbono/epoxi en impactos de alta velocidad se produce un tapón de cortadura debido a la respuesta localizada del punto de impacto (Figura 2.11).

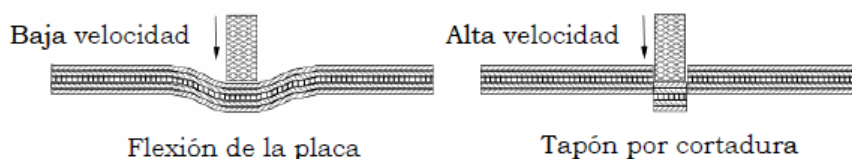



Figura 2. 11. Modo de fallo.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.3. ENSAYOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA

Para poder comprender el modo de fallo del material compuesto que ha sido sometido a un impacto, se llevan a cabo diferentes modos de inspección para cuantificar e identificar el daño.

2.3.1. Modos de fallo

Como se ha visto anteriormente hay varios modos de fallos (Figura 2.12) y estos se clasifican en dos grupos: interlaminares e intralaminares. El fallo interlaminar se debe a la propagación de una fisura entre láminas adyacentes que están orientadas de forma diferente, consiguiendo así, la separación o delaminación de las mismas. El fallo intralaminar se ocurre en el interior de una lámina, produciéndose el pandeo o rotura de la fibra, el agrietamiento de la matriz e incluso la falta de adhesión entre la fibra y la matriz.

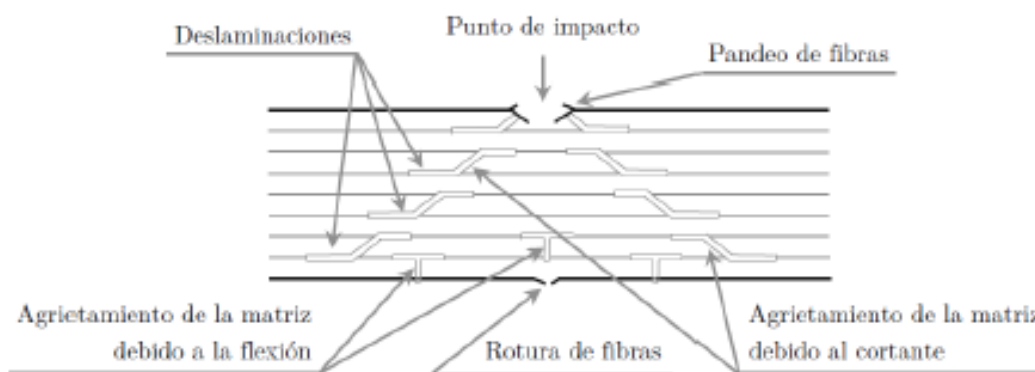


Figura 2. 12. Tipos de fallo.


2.3.2. Técnicas de inspección

Para poder determinar la cuantía del daño y la posibilidad de que el elemento pueda reutilizarse o ser reparado, se han desarrollado diversos métodos de inspección como: la inspección visual, la inspección radiográfica, la termografía de rayos infrarrojos y la inspección ultrasónica.

Inspección visual

La inspección visual se define como examinar un material (Figura 2.13), componente o producto utilizando la vista o con ayuda de dispositivos amplificadores. La inspección se convierte en una búsqueda de alguna anomalía o discontinuidad que pueda poner en duda el rendimiento de la pieza.

Una de las técnicas utilizadas es el análisis digital de imagen, que mediante la realización de varias fotografías con alta resolución y un sistema de iluminación que garantiza el mejor contraste entre el área dañada y el área no afectada en el impacto, es posible delimitar los contornos y determinar el área dañada.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

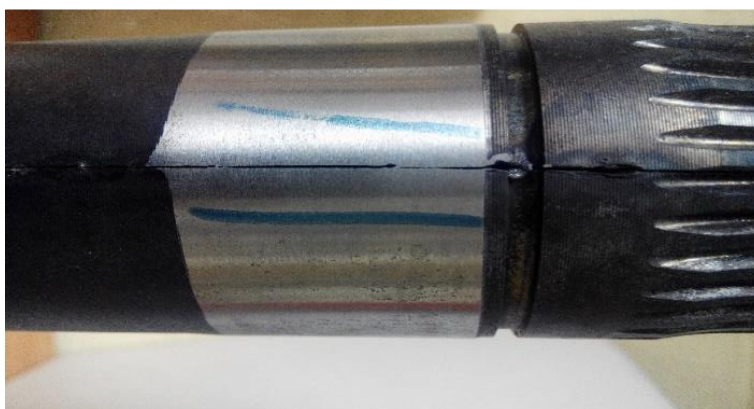


Figura 2. 13. Grieta en eje de transmisión.

Inspección radiográfica

Mediante los rayos X, radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia, que tienen capacidad de penetrar materiales opacos es posible determinar las discontinuidades debido a una diferencia del coeficiente de absorción y en la dispersión de los fotones de los rayos X. A través de este tipo de inspección (Figura 2.14) es posible detectar poros, defectos en núcleos, rechupes, etc.

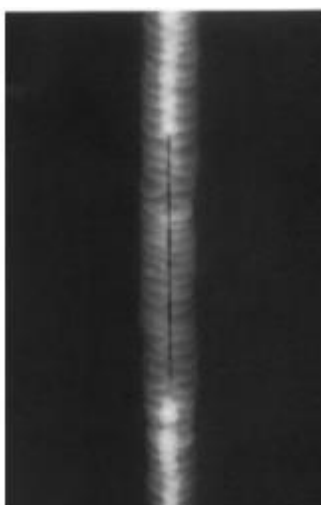



Figura 2. 14. Radiografía de la falta de penetración del material en una soldadura.

Termografía de rayos infrarrojos

Se basa en la heterogeneidad de la transmisión de calor en los elementos a inspeccionar (Figura 2.15). La aplicación de una fuente térmica induce un flujo de calor interno uniforme, en elementos dañados el mapa de temperaturas varía cuando se presenta alguna anomalía. Presenta la ventaja de realizar la inspección sin tener contacto directo con el elemento debido a que se utiliza una cámara infrarroja, aunque la resolución de la imagen no permite delimitar de forma precisa la zona dañada.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

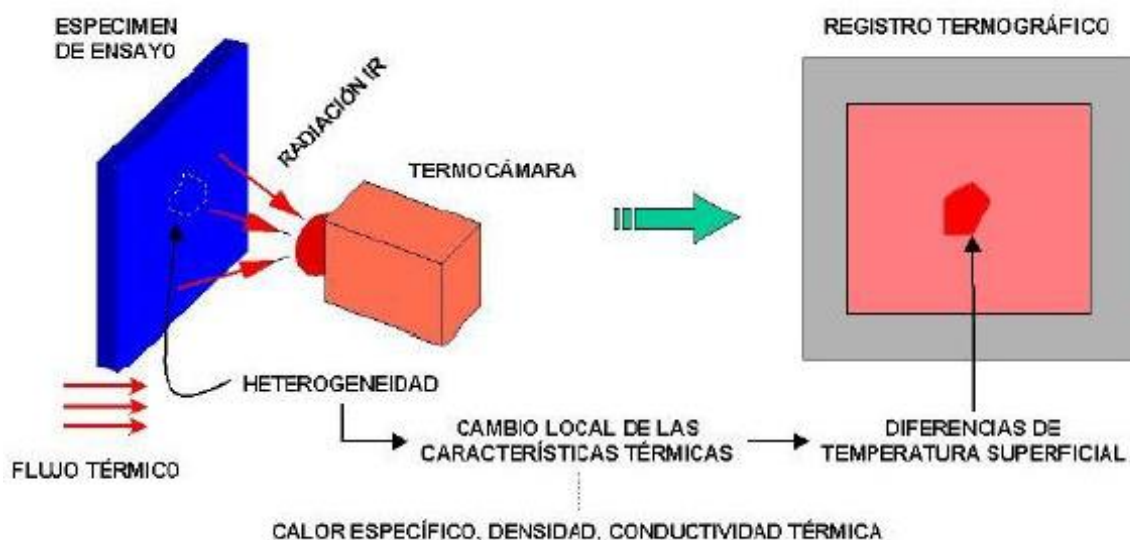


Figura 2. 15. Inspección por termografía.

Inspección ultrasónica

La técnica ultrasónica (Figura 2.16) se centra en la medida de la velocidad de propagación de una onda acústica a través de un elemento. En presencia de anomalías la propagación de la onda es interrumpida debido a la diferencia de la impedancia acústica entre el elemento y el defecto.

La técnica ultrasónica permite obtener resultados de alta calidad y fiabilidad, además de permitir aumentar la velocidad de inspección respecto a los otros métodos de inspección.

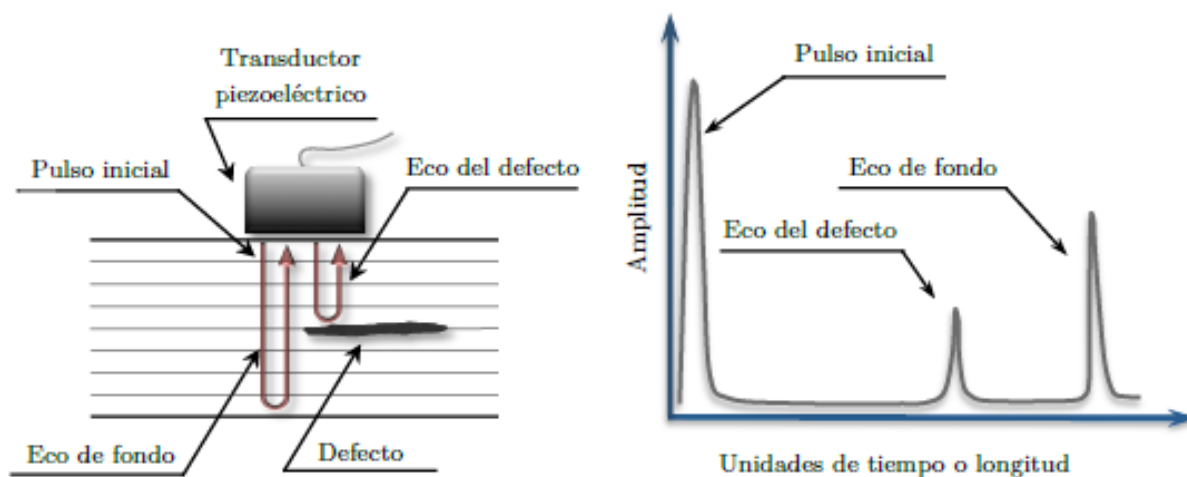



Figura 2. 16. Inspección por ultrasonidos.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.4. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA AL DAÑO EMPÍRICOS Y ANALÍTICOS

Los modos de fallo que pueden ocurrir en el impacto de materiales compuestos, derivan en la necesidad de desarrollar modelos para la predicción del daño inducido y de conocer las consecuencias que se puedan producir en las propiedades residuales del material. Los modelos predictivos pueden clasificarse en modelos empíricos, semiempíricos, analíticos y numéricos.

2.4.1. Modelos empíricos

En los modelos empíricos, los autores presentan un enfoque de varios parámetros para la evaluación del comportamiento de laminado sometidos a impactos de baja velocidad. Para ello, proponen una serie de ensayos para la evaluación del rendimiento de los compuestos a partir de parámetros empíricos como la energía disipada y el tiempo de contacto.

Debido a la realización de predicciones a partir de una cuantiosa cantidad de datos experimentales, estos modelos no proporcionan ningún avance para establecer leyes físicas que se puedan trasladar a otras situaciones, únicamente quedan relegados para aplicaciones de investigación.

2.4.2. Modelos semiempíricos

Debido al elevado coste de los ensayos experimentales, se realizan modelos basados en sistemas de masa-muelle (Figura 2.17) para predecir la curva de impacto frente a tiempo. En ensayos de baja velocidad, el comportamiento de la carga y la deformación transversal del laminado se modela como una combinación de muelles que representan la rigidez a flexión y cortadura.

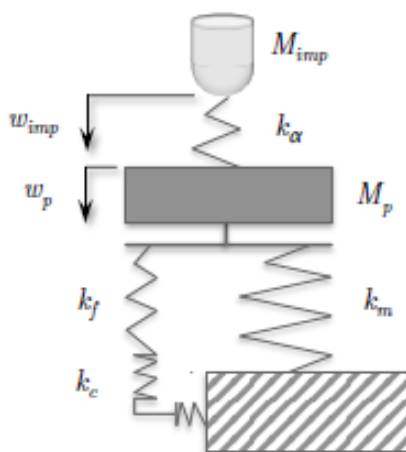



Figura 2. 17. Modelo de impacto de masa-muelle.

Estos modelos describen de forma precisa los parámetros clave para determinar la predicción de resistencia al daño por impacto, pero no tienen en cuenta aspectos como la naturaleza y extensión del daño que son esenciales en la predicción de las propiedades residuales. Además, estos modelos necesitan estar apoyados de datos experimentales.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.4.3. Modelos analíticos

A partir de los modelos analíticos se pretende obtener matemáticamente el estado tensional y las deformaciones que se generan durante el impacto. Para ello, se desarrollaron modelos analíticos con el fin de obtener la respuesta dinámica estructural de laminado de material compuesto, obteniendo de forma precisa la evolución de la fuerza de contacto, el estado de tensiones y deformaciones y los posibles mecanismos de fallo producidos en el impacto.

Algunos de estos modelos analíticos son: Wen [13], Taylor y Vinson [14], Gu [15], Naik et al. [16], Navarro [17] y López Puente [18].

H.M. Wen

A partir de ecuaciones simples se puede obtener la penetración y perforación para un rango de velocidades de impacto. Utiliza las suposiciones de que las deformaciones son localizadas y que la resistencia a la penetración de un laminado se puede descomponer en: una resistencia cuasi-estática cohesiva y una resistencia dinámica. Se ha demostrado que el modelo analítico cumple con los estudios experimentales realizados para diferentes tipos de proyectiles y geometrías del mismo.

W. Taylor y J.R. Vinson

Este modelo se basa en la teoría de placas, que incluyendo los efectos de la inercia rotatoria y las deformaciones contantes, permitiendo obtener la deformación mecánica y la respuesta dinámica del laminado. El modelo analítico fue validado experimentalmente con laminado de Kevlar.

B. Gu


El modelo establece que la energía absorbida por el laminado es la suma de la energía de deformación y la energía cinética en la región donde se produce el impacto. A partir de la ley de conservación de energía pudo establecer los valores de la velocidad residual que fue corroborado experimentalmente.

N.K. Naik y A.V. Doshi

Su modelo analítico se basó en criterios energéticos, considerando seis formas de fallo: fallo por rotura de las fibras primarias, deformación elástica de las fibras secundarias, formación y movimiento del cono en el lado posterior del laminado, deslaminación, rotura de la matriz y calor generado por la fricción entre el proyectil y el laminado.

C. Navarro

El modelo desarrollado se centró en la teoría de ondas eléctricas para una fibra sometida a un impacto transversal en una dimensión. Postuló que para la detección del proyectil únicamente participan las fibras, por lo que el modo de fallo del laminado es la rotura de las mismas.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

J. López-Puente, R. Zaera y C. Navarro

El modelo analítico considera tres mecanismos de absorción de energía en el impacto sobre laminados Carbono/Epoxi. Un mecanismo es la rotura del laminado por aplastamiento, otro es el momento lineal transferido desde el proyectil hasta la parte separada del laminado, y por último, la rotura de la fibra sometida a tracción. Utilizaron como variable de integración la distancia y obtuvieron una ecuación diferencial, que mediante el método de las perturbaciones, se llegó a una expresión simple para calcular la velocidad residual y el límite balístico. El modelo analítico fue validado experimentalmente.

2.5. MODELOS NUMÉRICOS

A partir de códigos de elementos finitos es posible de modelizar numéricamente elementos estructurales, que obteniendo soluciones de ecuaciones diferenciales parciales es posible definir el comportamiento de un dominio continuo. Estos códigos comerciales tienen implementados un gran número de modelos del comportamiento de materiales, aunque no todos los modelos son compatibles con los modelos de fallo con daño progresivo.

Un ejemplo de código numérico es Abaqus, el cuál implemento en las últimas versiones un modelo de fallo progresivo para materiales compuestos, con lo que se pudieron desarrollar modelos sencillos a bajo coste computacional. Otros códigos numéricos como Pamcrash, Autodyn o LS-Dyna también tienen implementado modelos para el estudio del fenómeno de impacto.

El uso de códigos comerciales ha permitido modelizar mecanismos de fallo en laminados compuestos sometidos a impacto. Por ejemplo, López-Puente et al. [19] realizaron una simulación numérica en Abaqus para describir el comportamiento frente a impacto de un laminado de fibra de carbono.


2.5.1. Modelos de fallo de materiales compuestos

Mediante modelos numéricos es posible determinar el comportamiento a impacto. La evolución de la simulación numérica ha propiciado el desarrollo de diferentes modelos [3, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. El desarrollo de diferentes modelos tiene la peculiaridad de no encontrar un único modelo que unifique los demás criterios. Puesto que se pretendía encontrar un modelo que unificará el resto, se realizó un estudio [26] en el que se demostró que ningún criterio de rotura expuesto predice de forma correcta el fallo de los laminados bajo cualquier estado de carga.

La modelización numérica requiere de la implementación de modelos que tengan en cuenta el modo de fallo. Algunos de estos modelos son: Chang y Chang [27], Hashin [20, 28] y Tsai-Hill y Tsai-Wu [29, 30].

Chang y Chang

El modelo Chang-Chang distingue entre los mecanismos de fallo que se producen entre la matriz y la fibra, identificando cuatro criterios en función de las contribuciones de los estados de tensiones (Figura 2.18).

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

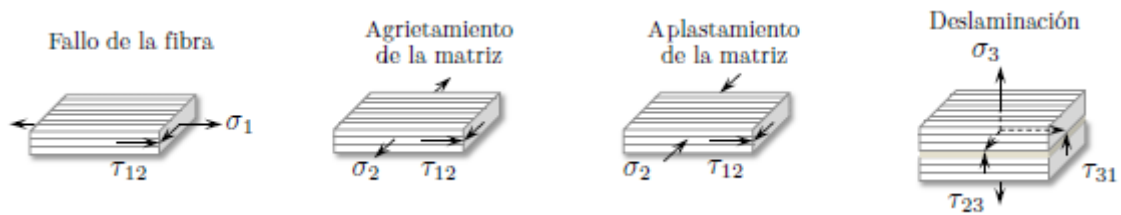


Figura 2. 18. Mecanismos de fallo.

Los criterios para cada mecanismo de fallo son:

- Fallo de la fibra

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$$

- Agrietamiento de la matriz

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \Rightarrow \sigma_2 > 0$$

- Aplastamiento de la matriz


$$e_m^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{-\sigma_2}{S_{12}}\right)^2 + \frac{Y_C \sigma_2}{4S_{12}^2} - \frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \Rightarrow \sigma_2 < 0$$

- Delaminación

$$e_l^2 = \left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 \geq 1$$

Donde:

- e_i representa el tipo de fallo.
- σ_1 , σ_2 , σ_3 , τ_{12} , τ_{23} y τ_{31} son respectivamente las tensiones normales y tensiones de cortadura en sus direcciones y planos correspondientes indicados por los subíndices.
- X_T hace referencia a la resistencia a tracción en la dirección de la fibra.
- Y_T es la resistencia a tracción en la dirección transversal a la fibra.
- Y_C es la resistencia a compresión en la dirección transversal a la fibra.
- Z_T representa la resistencia a tracción en la dirección a través del espesor.
- S_{12} , S_{23} y S_{31} son las resistencias a cizalladura en los planos correspondientes indicados por los subíndices.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

Hasta que alcanza el fallo ($e_i = 1$) el material se puede considerar que tiene un comportamiento ortótropo, elástico y lineal. Después, se produce la degradación de las propiedades en la dirección donde se ha producido el daño.

Hashin

En 1973, Hashin y Rotem establecen dos mecanismos de fallo que se producen en laminados multidireccionales sometidas a tensión. Uno de ellos se basa en el fallo de la fibra, el cual tiene su principal consecuencia por la tensión longitudinal a lo largo de la dirección de la fibra. El otro mecanismo de fallo, se basa en el fallo de la matriz, que se produce por las tensiones tangenciales y transversales a la dirección longitudinal de la fibra.

En 1980, Hashin revisa el criterio expuesto en 1973 y realiza algunas modificaciones, con el fin de establecer diferentes mecanismos de fallo, además de los propuestos, y así diferenciar entre diferentes estados tensionales de tracción y de compresión.

- Fallo de la fibra a tracción

$$I_f^t = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1$$

- Fallo de la fibra a compresión

$$I_f^c = \left(\frac{-\sigma_1}{X_C}\right)^2 \Rightarrow |\sigma_1| = X_C$$

- Fallo de la matriz a tracción


$$I_m^t = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1$$

- Fallo de la fibra a compresión

$$I_m^c = \left(\frac{\sigma_2}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1$$

Donde:

- I_f^t, I_f^c, I_m^t y I_m^c representa el tipo de fallo en la fibra o matriz sometida a tracción o compresión.
- σ_1, σ_2 y τ_{12} son respectivamente las tensiones normales y tensiones de cortadura en sus direcciones y planos correspondientes indicados por los subíndices.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

- X_T hace referencia a la resistencia a tracción en la dirección de la fibra.
- X_C hace referencia a la resistencia a compresión en la dirección de la fibra.
- Y_T es la resistencia a tracción en la dirección transversal de la fibra.
- Y_C es la resistencia a compresión en la dirección transversal de la fibra.
- S_L es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección longitudinal de la fibra.
- S_T es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección transversal de la fibra.

En el apartado 3.3.2. *Propiedades de las partes* se profundiza en la teoría de Hashin puesto que es la teoría utilizada en la resolución del impacto de alta velocidad y está implementada en Abaqus.

Tsai-Hill y Tsai-Wu

Los criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu relacionan el estado de tensión en el laminado teniendo en cuenta la interacción entre las diferentes direcciones. No obstante, el criterio de Tsai-Wu se diferencia del criterio Tsai-Hill en que discierne entre estados de tracción y compresión. Según ambos criterios, el fallo se produce cuando el valor IF, denominado índice de fallo, alcanza un valor igual a la unidad.

➤ Tsai-Hill


$$IF = \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} \geq 1$$

➤ Tsai-Wu

$$IF = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 \geq 1$$

Donde:

- σ_1 , σ_2 y τ_{12} son respectivamente las tensiones normales y tensiones de cortadura en sus direcciones y planos correspondientes indicados por los subíndices.
- X hace referencia a la resistencia en la dirección de la fibra.
- Y es la resistencia en la dirección transversal de la fibra.
- S_{12} es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección longitudinal de la fibra.
- F_1 , F_2 , F_{11} , F_{22} , F_{66} y F_{12} son funciones que definen la resistencia del material compuesto.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

2.5.2. Modelos cohesivos

Los modelos cohesivos pueden ser utilizados para modelar la deslaminación que se produce en las interfaces de los materiales compuestos. El comportamiento del cohesivo puede ser definido por la ley de tracción frente a la separación (Figura 2.19).

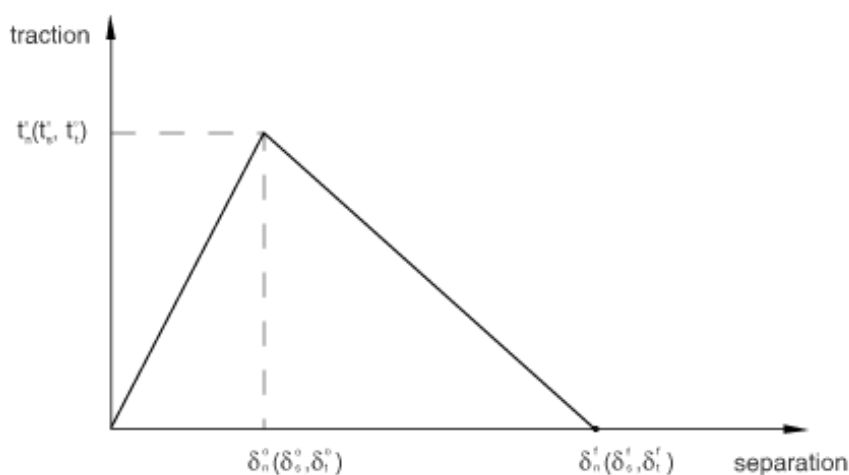


Figura 2. 19. Ley tracción-separación de un material cohesivo.

Cuando el valor de la tensión de tracción alcanza un máximo característico denominado resistencia interfacial (t_n^0) se produce el inicio del daño del material cohesivo. Cuando se alcanza la tenacidad a fractura, es decir, el área que encierra la curva tracción-separación tiene la suficiente energía para iniciar el avance de la grieta, la tensión a tracción se reduce a cero y se incrementa la superficie de la fisura (Figura 2.20).

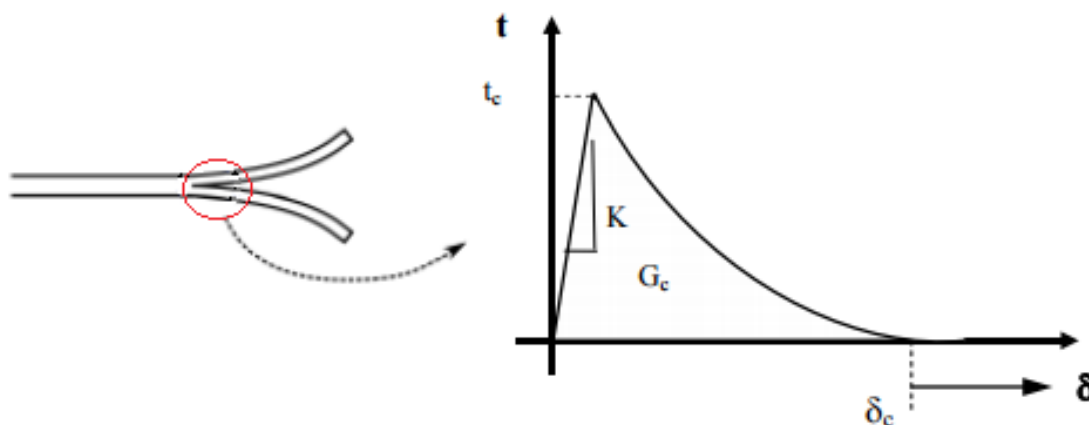



Figura 2. 20. Ley de propagación de la fisura.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

Modos de propagación de fisuras

Después de la formación de la fisura, la deslaminación se determinará por la resistencia del material. Para entender cómo se produce la propagación de la grieta, se identifican tres modos de carga (Figura 2.21)

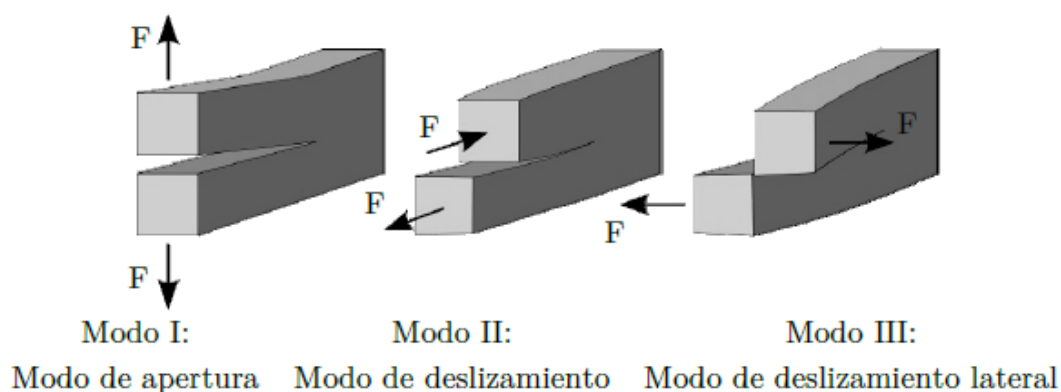


Figura 2. 21. Modos de carga.

El modo *I* de apertura se produce para tensiones de tracción, mientras que el modo *II* y *III* se desarrollan únicamente para tensiones tangenciales. Bajo cargas puras, el inicio de la delaminación se produce cuando la tracción interlámina es igual a su resistencia interfacial (t_I^0 , t_{II}^0 , t_{III}^0).

$$t_i = t_i^0$$

La propagación de la delaminación ocurre cuando la energía liberada (G_I , G_{II} o G_{III}) es igual a la tenacidad a fractura propia al material.


$$G_i = G_{ic}$$

En algunos casos la deslaminación se puede dar de forma aislada el modo *I*, el modo *II* o se puede producir una combinación de varios modos, dando lugar a un modo mixto de fractura *I* y *II* [31].

Ambas ecuaciones definen el inicio y la propagación de la fisura, que mediante diferentes modelos constitutivos relacionan la transición entre ambas etapas.

Modelos Constitutivos

El desarrollo de los modelos constitutivos ha facilitado la resolución de problemas complejos al implementarse en códigos numéricos. Mediante la ecuación constitutiva es posible relacionar las tracciones con la separaciones de la interfaz donde se produce la deslaminación o fisura. En la literatura hay diferentes modelos de ecuaciones constitutivas (Figura 2.22), siendo los más empleados el modelo de ecuación constitutiva bilineal [32], seguido por el modelo cubico/exponencial [33], el trapezoidal [34] o el perfectamente plástico [35].

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANTECEDENTES	

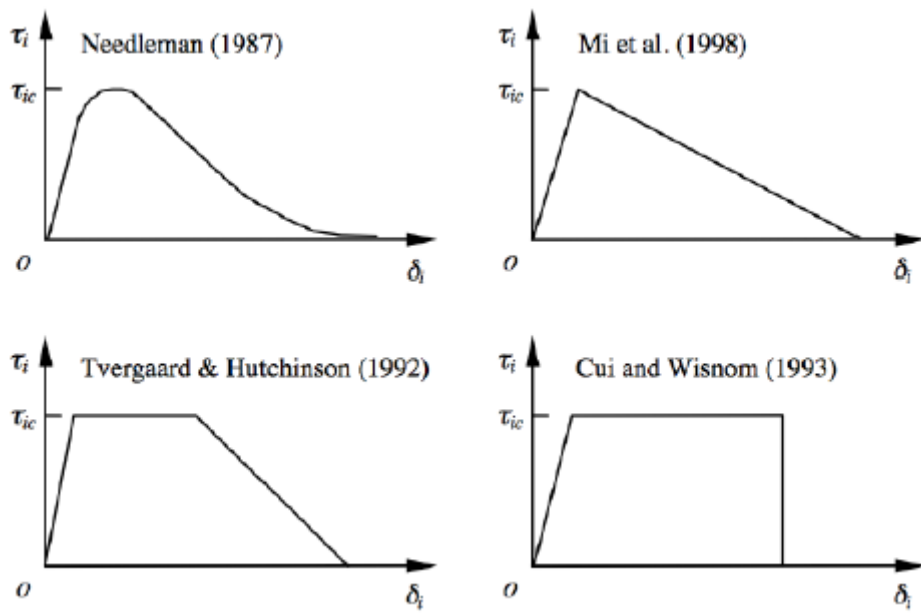



Figura 2. 22. Modelos constitutivos.



CAPITULO 3

MODELIZACIÓN NUMÉRICA



Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

3.1. SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS: ABAQUS

Abaqus FEA se desarrolló hace más de dos décadas, con el propósito de resolver problemas lineales y no lineales a partir de un código de elementos finitos. Se emplea para resolver problemas de cálculos estructurales estáticos y dinámicos, problemas de mecánica de fluidos y transferencia de calor, además de problemas piezoeléctricos.

Consta de cuatro productos: Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit, Abaqus/CAE y Abaqus/CFD.

Abaqus/Estándar

Este módulo de Abaqus se emplea para la resolución de problemas estáticos, los cuales necesitan de gran precisión. Incluye todas las posibilidades de análisis excepto el análisis dinámico a alta velocidad.

Abaqus/Explicit

El módulo Explicit es ideal para la resolución de problemas dinámicos transitorios. Se emplea para manejar eficazmente el comportamiento no lineal como el contacto y la resolución de aplicaciones cuasi-estáticas. Además se emplea para simular pruebas de impacto balístico y de automóvil.

Abaqus/CAE

El módulo CAE (Complete Abaqus Environment) permite la creación de forma rápida y eficiente de modelos de elementos finitos. Permite el modelado, análisis, gestión de trabajos y resultados para visualizarlos de forma coherente y sencilla.

Abaqus/CFD


El módulo CFD (Computational Fluid Dynamics) ofrece la capacidad de resolver problemas de dinámica de fluidos con un amplio soporte de procesamiento. Tiene la posibilidad de resolver problemas de flujo incompresible en flujos laminares y turbulentos, así como obtener resultados de problemas de convección térmica.

3.2. MODELOS DESARROLLADOS

Para el desarrollo del trabajo, se han estudiado diferentes modelos para observar la homogeneidad de los resultados, y así, poder obtener conclusiones del comportamiento del material frente a impacto. Se han desarrollado 6 modelos:

Modelo 1

Este modelo está compuesto por dos placas, cada una de ellas cuenta con 8 láminas dispuestas de forma cuasi-isótropa $[(+45, -45, 0, 90, +45, -45, 0, 90)_s]$. Ambas placas están unidas por medio de una placa de espesor delgado de material cohesivo. El laminado en conjunto tiene un espesor total de 3,104 mm. Los espesores de cada unidad son los siguientes:

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

- Las placas de material compuesto tienen un espesor de 1,527 mm cada una, por lo tanto, cada lámina posee un espesor de 0,190875 mm.
- La placa de material cohesivo tiene un espesor de 0,05 mm.

Modelo 2

El modelo se compone de la misma geometría, con una única distinción, la orientación de las láminas [(0, 0, +45, +45, 90, 90, -45, -45)_s].

Modelo 3

El modelo posee la misma geometría que el Modelo 1, a diferencia de la orientación de las láminas [(0, 0, 0, 0, 90, 90, 90, 90)_s]. A este tipo de laminado se le denomina ortótropo.

Modelo 4

Al igual que el resto de los modelos, tiene como variación la orientación del laminado, obteniendo así, un laminado unidireccional. [(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)_s].

Modelo 5

Se tiene un modelo similar al Modelo 1 en cuanto a la orientación de las láminas por separado y la geometría, pero con diferencia en el apilamiento [(+45, 90, -45, 0, +45, 90, -45, 0)_s].

Modelo 6

Este modelo presenta la misma geometría que el resto de los modelos y una orientación atípica en cuanto a laminados de fibra de carbono [(30, -60, +60, -30, 30, -60, +60, -30)_s].

Ambos modelos serán sometidos a impacto de alta velocidad, analizando los modelos en un rango de velocidades entre 60-500 m/s. Se pretende observar la influencia de la orientación de las láminas y ver cómo afecta a la velocidad residual, al límite balístico y al área afectada por el proyectil.


3.3. MODELIZACIÓN

A continuación se describe un modelo numérico implementado, puesto que los demás modelos tienen la misma geometría y materiales, con la única diferencia de la orientación de las láminas de material compuesto.

3.3.1. Disposición de las partes

La realización del impacto se produce sobre un laminado compuesto de dos placas de material compuesto y entre ambas una placa de material cohesivo (Figura 3.1).

Todas las placas presentan la misma dimensión, $100 \times 100 \text{ mm}^2$, teniendo un espesor la placas de material compuesto de 1,527 mm y la placa de material cohesivo 0,05 mm. En cuanto al proyectil esférico de acero, tiene un diámetro de 7,5 mm.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

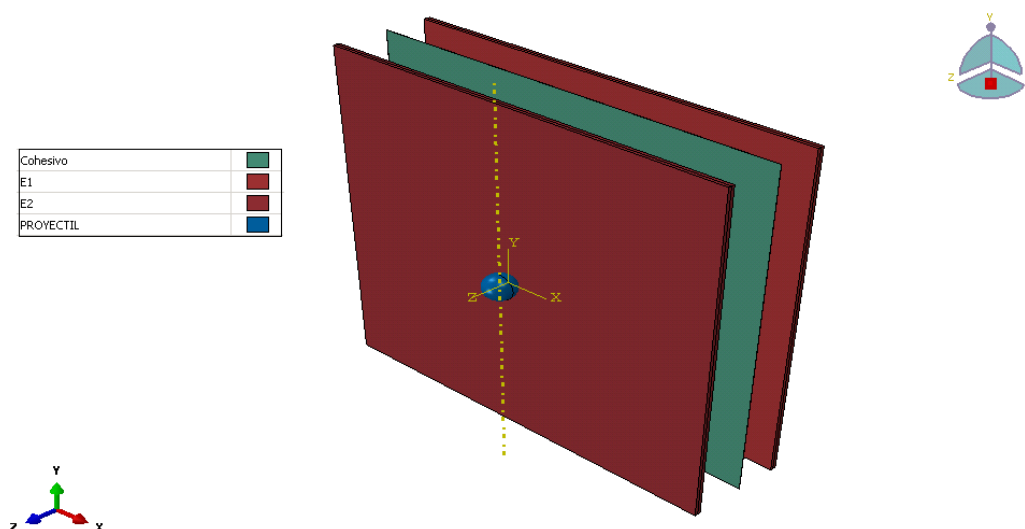


Figura 3. 1. Disposición de las partes.

3.3.2. Propiedades de las partes

Como ya se ha comentado, el ensayo se compone de dos placas de material compuesto, una placa de cohesivo y un proyectil esférico de acero. A continuación, se procederá a explicar las propiedades de cada material.


Material compuesto

Cada placa de material compuesto está constituida por 8 láminas apiladas con diferente orientación. En la Tabla 3.1 se presentan las propiedades del material compuesto, que para el estudio realizado se trata de cinta AS4/8552.

MATERIAL COMPUESTO – AS4/8552					
Densidad [ton/mm ³]	E_1 [MPa]	$E_2 = E_3$ [MPa]	G_{12} [MPa]	$G_{23} = G_{31}$ [MPa]	Coefficiente de Poisson ν
$1,58 \cdot 10^{-9}$	139000	9000	5000	4500	0,3089
X_C [MPa]	X_T [MPa]	Y_C [MPa]	Y_T [MPa]	S_C [MPa]	α
1656	2105	175	79	114	0,04

Tabla 3. 1. Propiedades de cinta AS4/8552.

Además, a través de Abaqus se ha escogido el modelo de Hashin para predecir el comportamiento al daño. La formulación de Hashin implementada por Abaqus es la siguiente:

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

- Fallo a tracción de la fibra

$$I_f^t = \left(\frac{\sigma_1}{X_T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2$$

- Fallo a compresión de la fibra

$$I_f^c = \left(\frac{-\sigma_1}{X_C} \right)^2$$

- Fallo a tracción de la matriz

$$I_m^t = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2$$


- Fallo a compresión de la matriz

$$I_m^c = \left(\frac{\sigma_2}{2S_T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2$$

Donde:

- I_f^t, I_f^c, I_m^t y I_m^c representa el tipo de fallo en la fibra o matriz sometida a tracción o compresión.
- σ_1, σ_2 y τ_{12} son respectivamente las tensiones normales y tensiones de cortadura en sus direcciones y planos correspondientes indicados por los subíndices.
- X_T hace referencia a la resistencia a tracción en la dirección de la fibra.
- X_C hace referencia a la resistencia a compresión en la dirección de la fibra.
- Y_T es la resistencia a tracción en la dirección transversal de la fibra.
- Y_C es la resistencia a compresión en la dirección transversal de la fibra.
- S_L es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección longitudinal de la fibra.
- S_T es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección transversal de la fibra.
- α es un coeficiente que determina la contribución de la tensión de cortadura.

Cuando el valor del índice de fallo es igual a la unidad, significa que ha comenzado el inicio del daño. Una vez producido el daño, comienza la degradación del material, la cual está definida por una ley de evolución lineal de energía (Figura 3.2) que está implementada en Abaqus.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

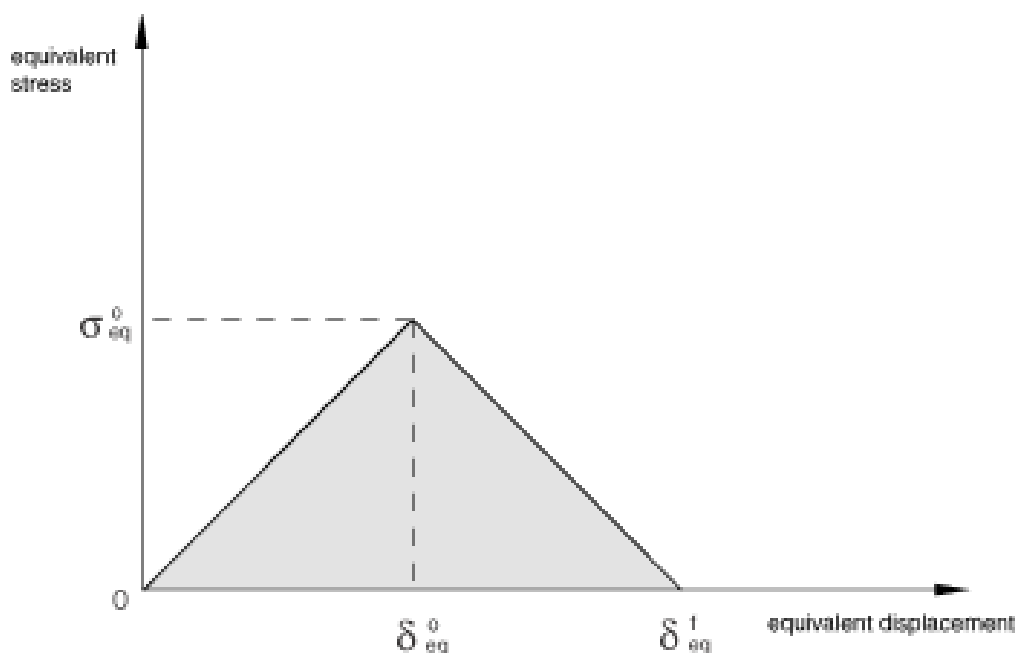


Figura 3. 2. Ley de evolución lineal de energía del daño.

Para la aplicación de esta ley, Abaqus requiere el valor de las energías disipadas durante el daño para cada uno de los modos de fallo: tracción de la fibra, compresión de la fibra, tracción de la matriz y compresión de la matriz. Los resultados se exponen en la Tabla 3.2.

- Tracción de la fibra:

$$G_f^t = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{X_T^2}{E_1} \cdot L_c$$

- Compresión de la fibra:

$$G_f^c = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{X_C^2}{E_1} \cdot L_c$$

- Tracción de la matriz:


$$G_m^t = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{Y_T^2}{E_2} \cdot L_c$$

- Compresión de la matriz:

$$G_m^c = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{Y_C^2}{E_2} \cdot L_c$$

Donde:

- X_T hace referencia a la resistencia a tracción en la dirección de la fibra.
- X_C hace referencia a la resistencia a compresión en la dirección de la fibra.
- Y_T es la resistencia a tracción en la dirección transversal de la fibra.
- Y_C es la resistencia a compresión en la dirección transversal de la fibra.
- E_1 es el módulo elástico en la dirección de la fibra.
- E_2 es el módulo elástico en la dirección de la matriz.
- L_c es la longitud del elemento.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

MATERIAL COMPUESTO – AS4/8552			
G_f^t [N/mm]	G_f^c [N/mm]	G_m^t [N/mm]	G_m^c [N/mm]
17,53	10,85	0,38	1,87

Tabla 3. 2. Propiedades de la evolución del daño.

En cuanto a la orientación de las láminas, puesto que hay diferentes modelos en los cuales cambia la orientación de las mismas. En la Tabla 3.3 se representa el laminado para cada modelo.


	PLACA SUPERIOR E1								COHESIVO	PLACA INFERIOR E2
MODELO 1	+45	-45	0	90	+45	-45	0	90		Simétrico
MODELO 2	0	0	+45	+45	90	90	-45	-45		Simétrico
MODELO 3	0	0	0	0	90	90	90	90		Simétrico
MODELO 4	0	0	0	0	0	0	0	0		Simétrico
MODELO 5	+45	90	-45	0	+45	90	-45	0		Simétrico
MODELO 6	+30	-60	+60	-30	+30	-60	+60	-30		Simétrico

Tabla 3. 3. Distribución del laminado.

Material cohesivo

En cuanto al material cohesivo, dependiendo del autor se encuentran diferentes propiedades que determinan el material. Para definir el cohesivo, a partir de la literatura se han recopilado las propiedades utilizadas en el trabajo de López-Puente et al. [2]. Para determinar el comportamiento frente al daño, se ha escogido el criterio cuadrático con una evolución del daño de tipo potencial. Según este modelo basado en energías, el fallo se produce en condiciones de modo mixto y se rige por una interacción con forma de ley potencial de las energías para causar el fallo en los modos puros o individuales. Se expresa de la siguiente manera:


$$\left(\frac{G_n}{G_n^c}\right)^\alpha + \left(\frac{G_s}{G_s^c}\right)^\alpha + \left(\frac{G_t}{G_t^c}\right)^\alpha = 1$$

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

Donde G_n^C , G_s^C y G_t^C hacen referencia a las energías de fractura críticas requeridas para causar un fallo en la dirección normal y en la dirección tangencial. Las propiedades del cohesivo se muestran en la Tabla 3.4.

COHESIVO		
Densidad [ton/mm ³]	$E_N = E_T$ [MPa]	
$1,5 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^3$	
Tracción máxima en la dirección normal T [MPa]	Tracción máxima en la dirección tangencial 1 S_1 [MPa]	Tracción máxima en la dirección tangencial 2 S_2 [MPa]
50	56	56
Energía de fractura en modo I G_{IC} [mJ/mm ²]	Energía de fractura en modo II dirección 1 G_{IIC} [mJ/mm ²]	Energía de fractura en modo II dirección 2 G_{IIC} [mJ/mm ²]
0,25	0,75	0,75

Tabla 3. 4. Propiedades del cohesivo.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

Proyectil

El proyectil está compuesto de acero siendo sus propiedades uniformes e isotrópicas en todo su volumen. Además, se considera que la sección es sólida y homogénea. La relación tensión-deformación está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix}$$


Donde E es el módulo elástico y ν el coeficiente de Poisson. Por otro lado, el módulo de cortadura, G , se define como:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Las propiedades del acero se representan en la Tabla 3.5.

PROYECTIL		
Densidad [ton/mm ³]	E [MPa]	Coeficiente de Poisson ν
$7,85 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3

Tabla 3. 5. Propiedades del proyectil.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

3.3.3. Interacciones

Para definir las interacciones que actúan en el modelo numérico, se ha utilizado la unión entre la placa de material cohesivo con las placas de material compuesto, a través de la función establecida en Abaqus como *Tie* (Figura 3.3).

Además, se define el contacto entre todas las superficies que actúan en el ensayo, puesto que pueden tocarse entre sí, con un coeficiente de rozamiento entre elementos de 0,2.

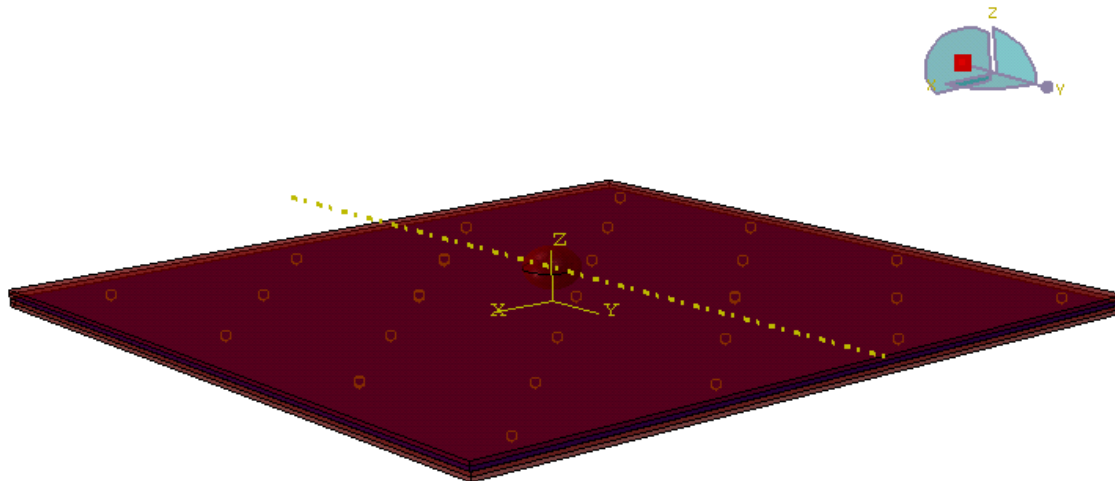


Figura 3. 3. Visualización del Tie.

3.3.4. Condiciones de contorno y cargas aplicadas

Puesto que el laminado es sometido a impacto, es necesario definir las condiciones de contorno a las que se encuentra el material. Debido a que Abaqus permite la realización de ensayos dinámicos, se ha tomado la decisión de no restringir ningún punto del laminado, por lo que se encuentra libre, desplazándose una distancia despreciable debido al tiempo de cálculo.

En el proyectil se impone una velocidad lineal por tratarse de un impacto de alta velocidad. La velocidad del proyectil será estudiada en un rango de 60 m/s a 500 m/s en dirección del eje z (Figura 3.4).

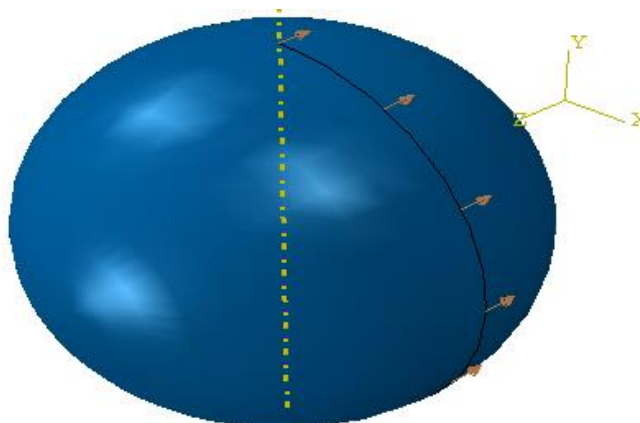



Figura 3. 4. Carga dinámica en el proyectil.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

3.3.5. Mallado de las partes

Para la realización del mallado ha sido necesario realizar un mallado independiente por cada elemento que forma parte del modelo. Para ello, se ha creado una malla para: las placas de material compuesto, la placa cohesiva y el proyectil.

Material compuesto

El mallado del material compuesto se define por hexaedros de tamaño del elemento de 1 mm , obteniendo así una red de celdas regulares y sin geometrías complicadas. Los elementos utilizados son del tipo *Continuum Shell* (Figura 3.5), propias de geometrías de láminas o placas de espesor delgado. El tipo de elemento está definido en Abaqus como un elemento SC8R. Este tipo de mallado es una combinación del mallado tipo Sólido y tipo Shell.

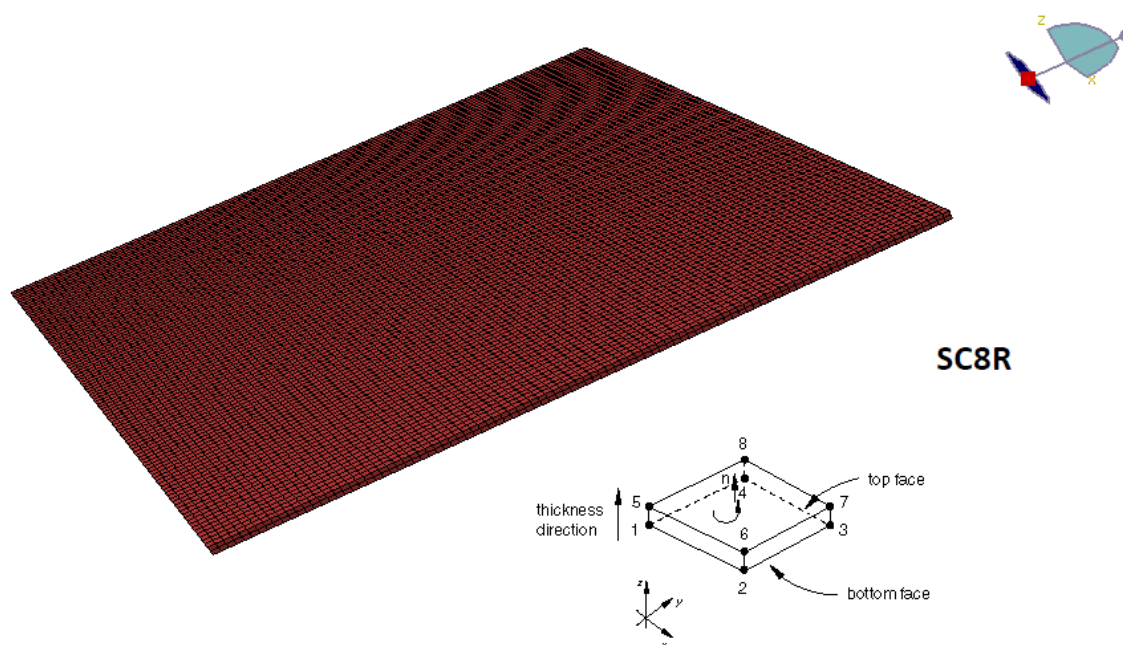



Figura 3. 5. Malla de tipo Continuum Shell.

Material cohesivo

Para establecer el mallado del material cohesivo es importante definir la orientación de cada elemento correctamente, ya que el comportamiento es diferente en el espesor y en el plano. Se ha utilizado un mallado estructurado de hexaedros con elementos de 1 mm . El tipo de elemento definido en Abaqus se denomina COH3D8, puesto que se trata de un elemento explícito de tipo *Cohesive* (Figura 3.6).

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

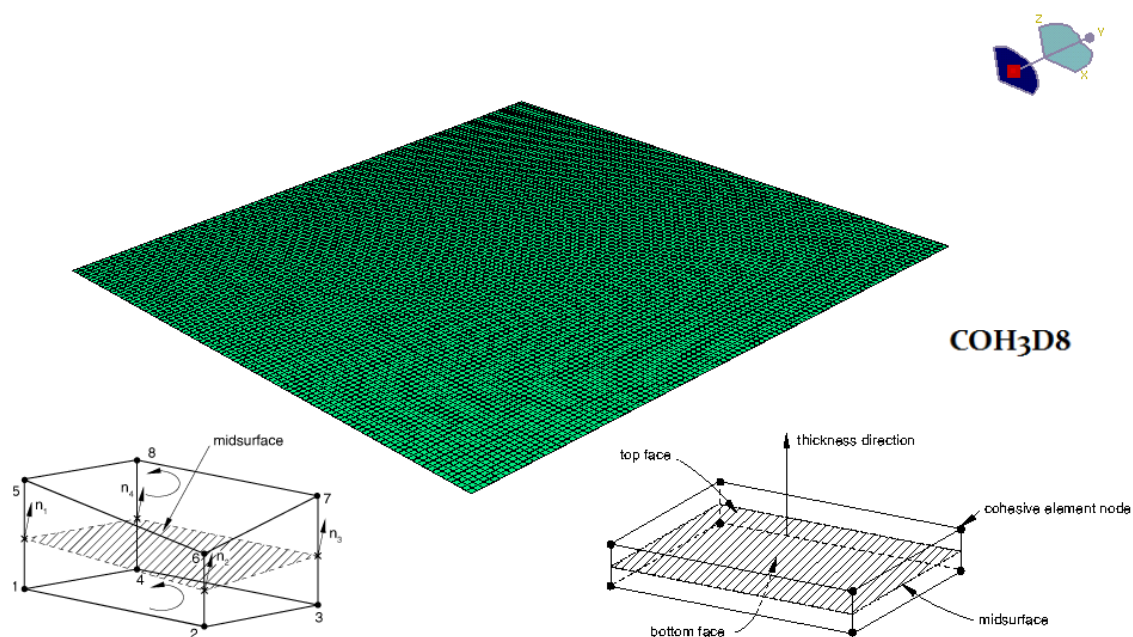


Figura 3. 6. Malla de tipo Cohesive.

Proyectil

Para realizar el mallado del proyectil esférico se han utilizado elementos tetraédricos, obteniendo así una red de celdas lo más ordenada posible. El tamaño del elemento es aproximado a $0,85 \text{ mm}$ con 10 nodos por cada uno. En Abaqus se denomina a este elemento como C3D10M compuesto de elementos explícitos de tipo *3D Stress* (Figura 3.7).

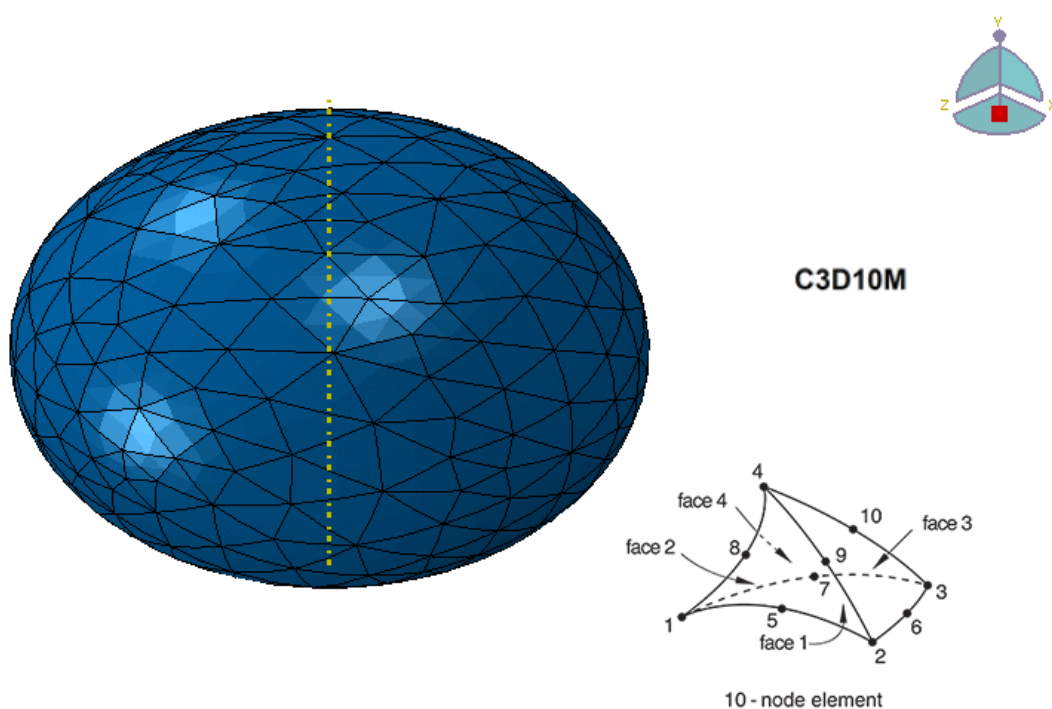



Figura 3. 7. Malla de tipo 3D Stress.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	

Finalmente, tenemos un modelo numérico formado por cuatro partes que en total suman 53.358 elementos (Figura 3.8). En la Tabla 3.6 se representan el número de elementos por cada una de las partes.

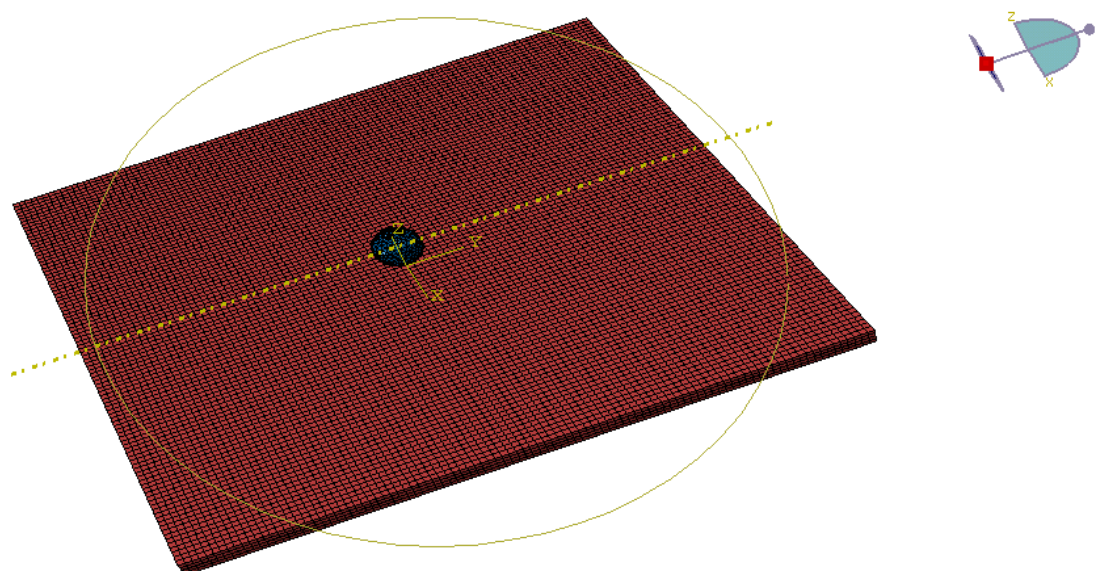


Figura 3. 8. Mallado del modelo numérico.

MODELO		
Parte	Tipo	Elementos
Material compuesto – E1	<i>Continuum Shell</i> - SC8R	20.000
Material compuesto – E2	<i>Continuum Shell</i> - SC8R	20.000
Material Cohesivo	<i>Cohesive</i> – COH3D8	10.000
Proyectil	<i>3D Stress</i> – C3D10M	3.358


Tabla 3. 6. Elementos de cada parte.



CAPITULO 4

RESULTADOS



Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el Capítulo 4, se procederá a exponer los resultados de interés en este tipo de ensayos: velocidad residual, límite balístico y área afectada.

Además de comentar estos resultados, se realizara especial hincapié en la forma de penetración y perforación del proyectil en cada uno de los modelos, y se determinara el porqué de lo sucedido.

Por último, se compararán los resultados numéricos con los resultados experimentales del estudio realizado por López-Puente et al. [1].

4.2. VELOCIDAD RESIDUAL

En la Figura 4.1 se exponen las curvas de velocidad residual frente a velocidad de impacto. Como se puede observar, los modelos presentan las curvas características de este tipo de ensayos. Una vez alcanzan el límite balístico la velocidad residual se incrementa de forma cuadrática.

Los modelos de laminados cuasi-isótropos (Modelo 1, Modelo 2 y Modelo 5) tienen un límite balístico similar obteniendo una variación mínima. Además, a velocidades próximas a la máxima del ensayo se obtiene también velocidades residuales equivalentes. Por lo que se puede establecer que al contener la misma orientación de las fibras en el laminado, éstas no son determinantes en el cálculo de la variación de la velocidad residual en función de la velocidad de impacto. El orden de apilamiento puede influir, como se observa en la gráfica, en la variación de la curva ya que presentan cierta variación y las líneas no son coincidentes.

En cuanto al Modelo 3, que se trata de un laminado ortótropo, presenta el límite balístico mayor a los modelos calculados. Esto se debe a que el laminado soporta mejor el impacto perpendicular al plano, ya que las fibras resisten mejor dispuestas en 0° y 90° . Las fibras trabajan mejor a tensiones normales, mientras que a tensiones tangenciales su resistencia disminuye produciéndose el fallo de estas. En este modelo, posiblemente las fibras estén trabajando a flexión, dando lugar a tensiones de tracción y compresión.

La curva del Modelo 4 presenta valores cercanos a los modelos cuasi-isótropos, pero cabe destacar que no tiene la misma linealidad que estos modelos, pues los resultados varían notablemente. Además, presenta la menor velocidad para las velocidades más altas de la modelización numérica.

Por último, el Modelo 6 confirma la teoría anteriormente expuesta de que la orientación de las fibras en orientaciones diferentes no influye de forma determinante en el límite balístico, y posteriormente en la velocidad residual.

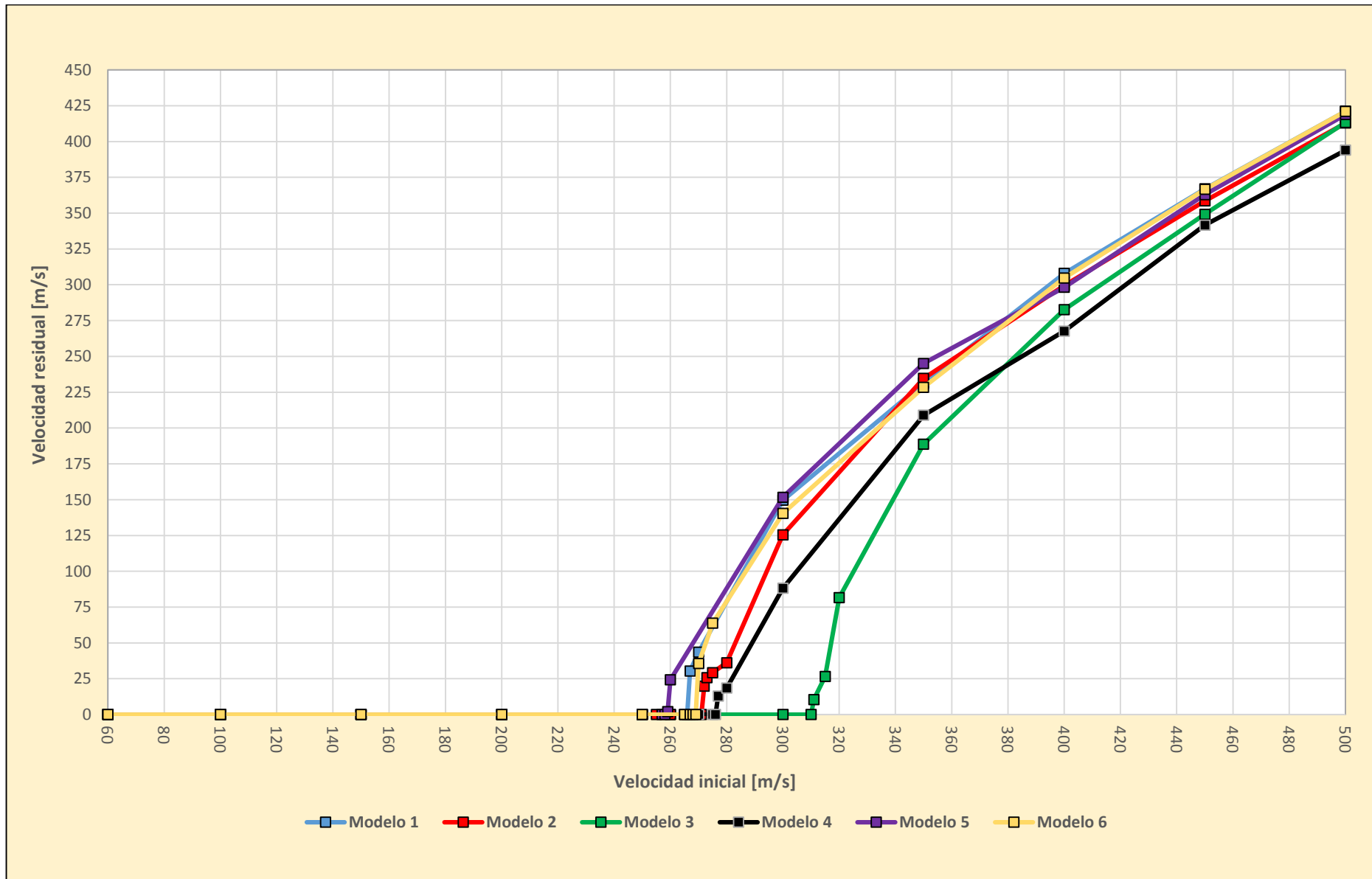



Figura 4. 1. Curva Velocidad Residual - Velocidad Inicial de cada modelo numérico.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

En la Tabla 4.1 se presenta el límite balístico para cada uno de los modelos numéricos.

MODELO NUMÉRICO	LÍMITE BALÍSTICO
Modelo 1	267 m/s
Modelo 2	272 m/s
Modelo 3	311 m/s
Modelo 4	277 m/s
Modelo 5	260 m/s
Modelo 6	270 m/s

Tabla 4. 1. Límite balístico de cada modelo numérico.

En la tabla 4.2 se expone los resultados de la velocidad residual obtenida a la máxima velocidad de la modelización, a 500 m/s.

MODELO NUMÉRICO	VELOCIDAD RESIDUAL
Modelo 1	421 m/s
Modelo 2	413 m/s
Modelo 3	413 m/s
Modelo 4	394 m/s
Modelo 5	419 m/s
Modelo 6	421 m/s

Tabla 4. 2. Velocidad Residual del proyectil a una velocidad inicial de 500 m/s.

4.3. ÁREA DAÑADA

Un aspecto importante en los ensayos de impacto es obtener la superficie dañada producida por el proyectil. Para ello, se analizan los elementos que dejan de estar activos en el material cohesivo. La curva característica de este tipo de análisis es que según aumenta la velocidad hasta el límite balístico, el área dañada aumenta (Figura 4.2b), mientras que a mayores velocidades del límite balístico el área afectada se reduce hasta representar el área del proyectil (Figura 4.2c).

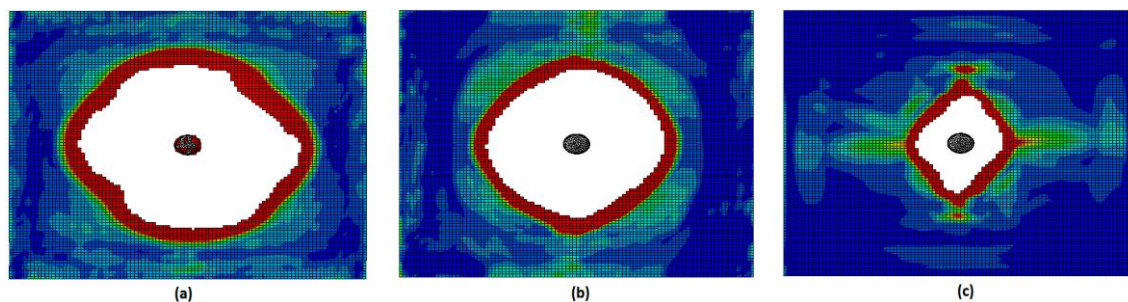


Figura 4. 2. Area dañada. a) 200 m/s b) 267 m/s c) 500 m/s.

Se ha representado una gráfica para un conjunto de laminados, una para los modelos cuasi-isótropos y el Modelo 6 (Figura 4.3), y otra representa el modelo ortótropo y el unidireccional (Figura 4.4).

Todos los modelos presentan una curva semejante en cuanto a la forma que posee, para velocidades cercanas al límite balístico se produce la máxima degradación del laminado, y a medida que aumenta la velocidad inicial de impacto la superficie dañada disminuye hasta alcanzar valores próximos al área del proyectil esférico.

En la Tabla 4.3 se exponen los valores del área máxima dañada y a la velocidad a la cual se produce para cada modelo.

MODELO NUMÉRICO	AREA MÁXIMA DAÑADA	VELOCIDAD RESIDUAL
Modelo 1	4077 mm ²	265 m/s
Modelo 2	5598 mm ²	270 m/s
Modelo 3	3910 mm ²	250 m/s
Modelo 4	4048 mm ²	276 m/s
Modelo 5	3657 mm ²	259 m/s
Modelo 6	4731 mm ²	267 m/s

Tabla 4. 3. Área máxima dañada.

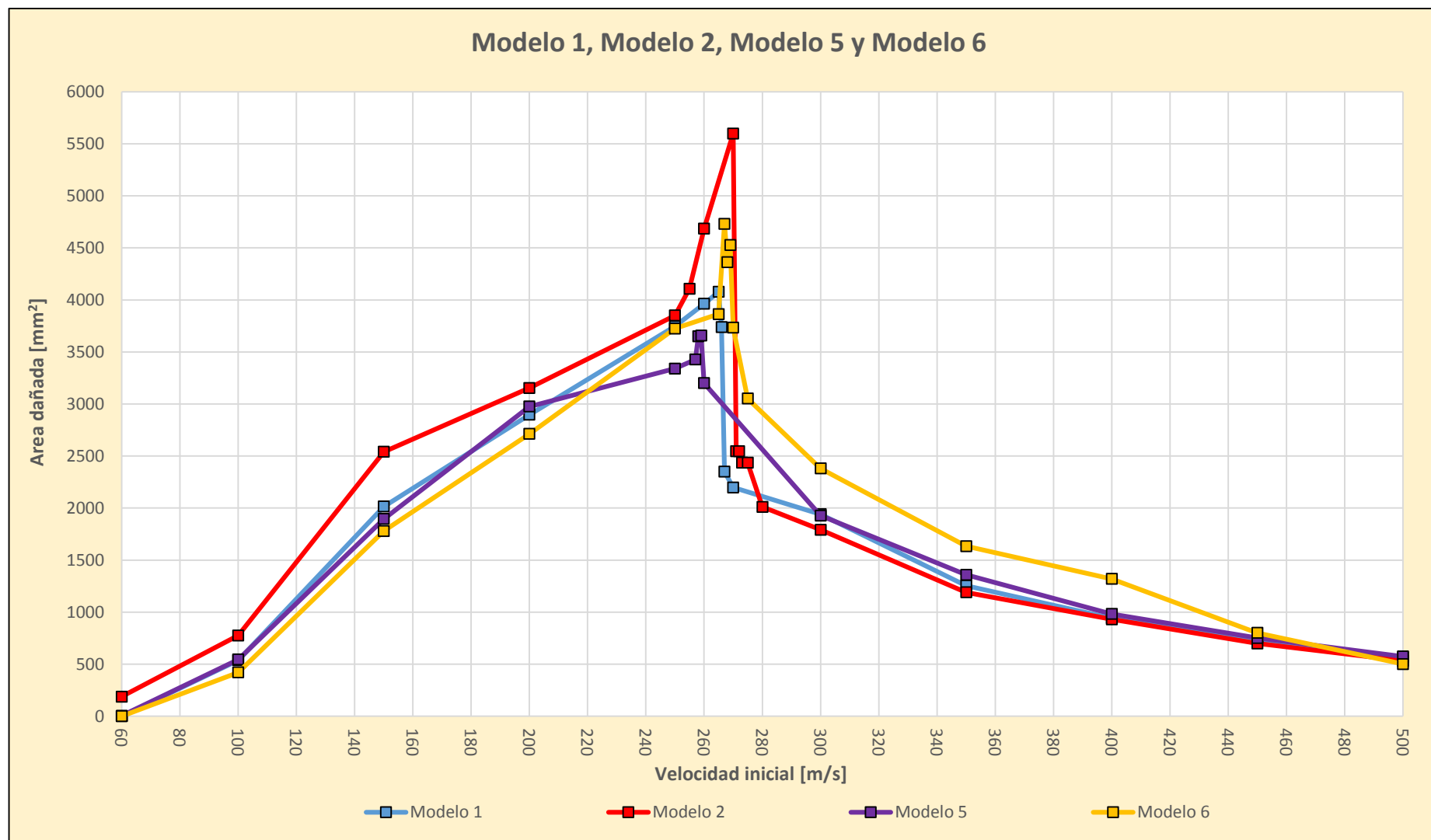


Figura 4. 3. Curva Área dañada – Velocidad Inicial de los modelos cuasi-isótropos y el Modelo 6.

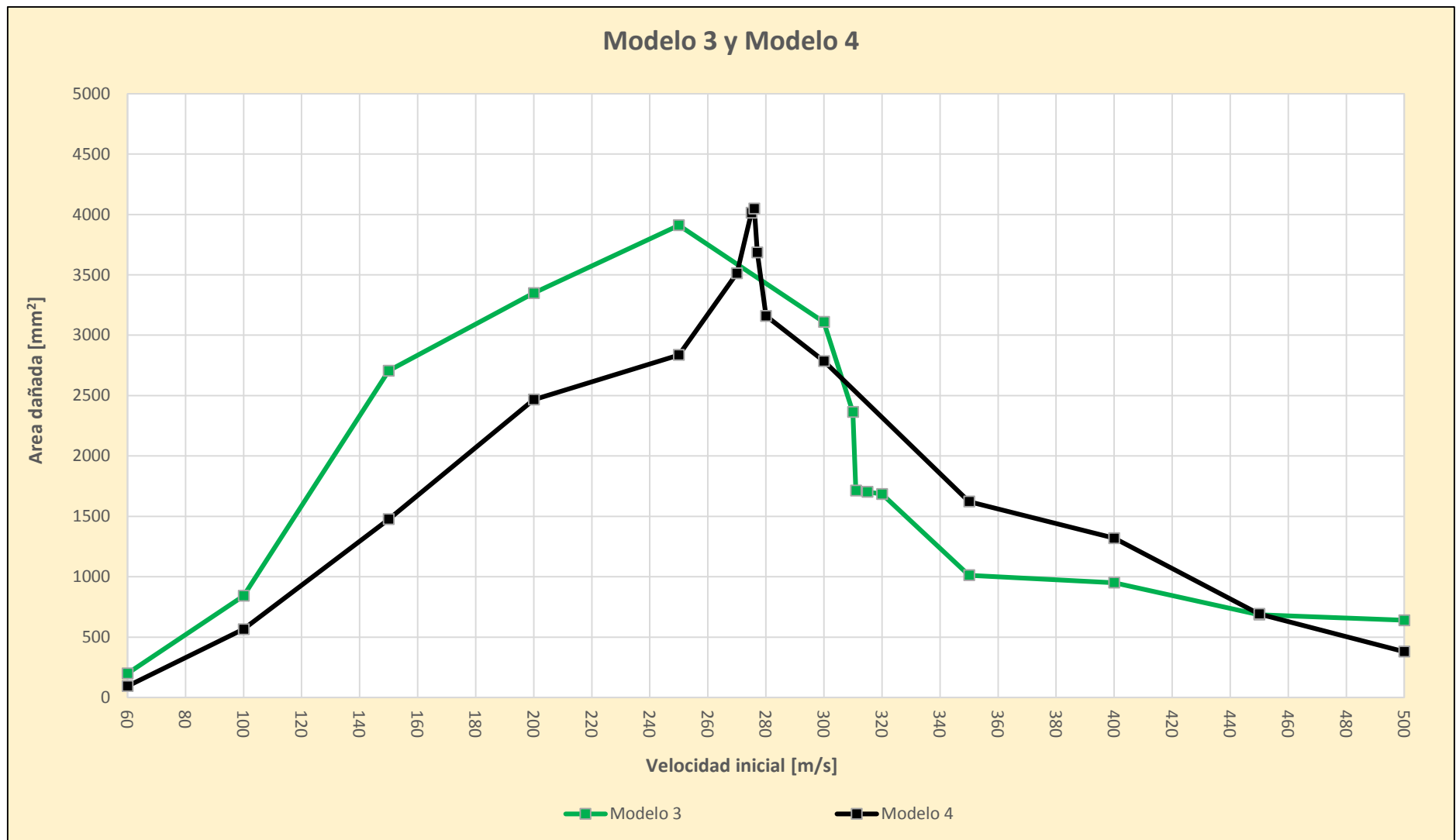



Figura 4. 4. Curva Área dañada – Velocidad Inicial del Modelo 3 y el Modelo 4.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

Como se puede observar, en los modelos cuasi-isótropos se produce el mayor daño en comparación al laminado unidireccional u ortótropo. En concreto el Modelo 2 presenta la superficie dañada más alta. A diferencia de lo que ocurriría en el cálculo de la velocidad residual del proyectil, la secuencia de apilamiento tiene importancia a la hora de cuantificar el daño que se produce sobre el cohesivo.

En cuanto al Modelo 3 se ha obtenido una curva más moderada que las anteriores cuando supera el límite balístico. Además, cabe destacar que el área dañada máxima no se alcanza en el límite balístico como ocurre en los anteriores modelos.

Tanto para el Modelo 3 y el Modelo 4, como para el Modelo 1 y el Modelo 5, se tiene prácticamente la misma máxima área dañada.

En el Modelo 3 no presenta un máximo puntiagudo como el resto de modelos, la razón de ello puede establecerse que al ser un laminado ortótropo no tiene fibras dispuestas a 45° y por lo tanto no se produce la degradación del cohesivo notablemente como ocurre en el resto de los modelos. Es decir, en los modelos ortótropos el daño del cohesivo aumenta en la dirección de las fibras (Figura 4.5).

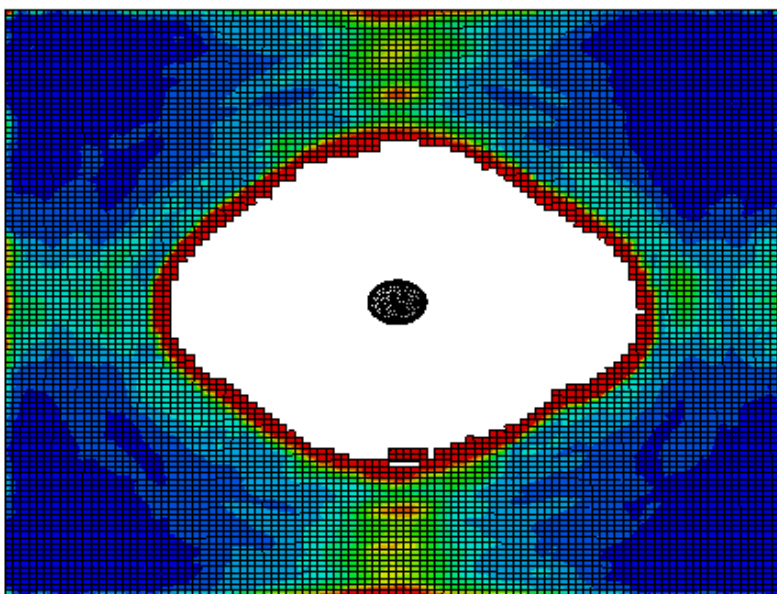



Figura 4. 5. Degradación del cohesivo del Modelo 3.

Sin embargo, la degradación del cohesivo para el Modelo 1, el Modelo 2, el Modelo 5 y el Modelo 6 aumenta de forma circunferencial, debido a que estos modelos están compuestos de fibras a 45° (Figura 4.6).

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

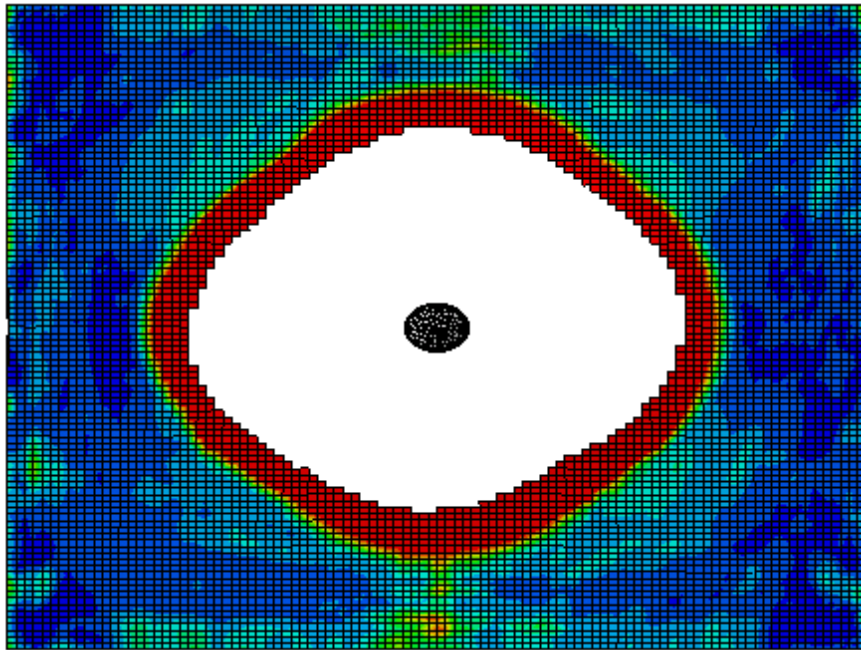


Figura 4. 6. Degradación del cohesivo del Modelo 1.

Para el Modelo 4, puesto que es un laminado unidireccional, se tiene que la degradación del cohesivo se tiene principalmente en la dirección de las fibras (Figura 4.7).

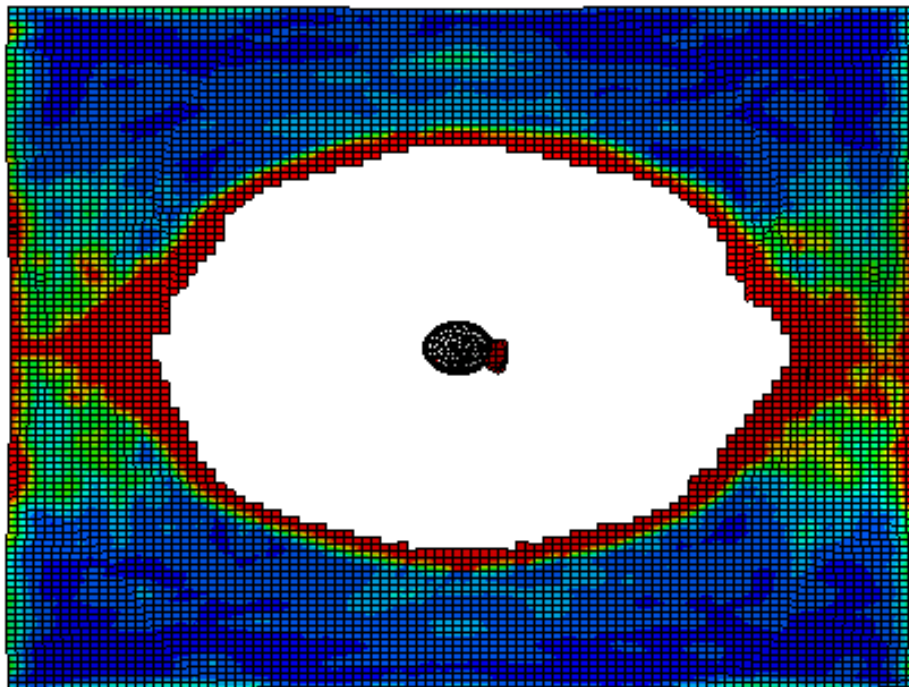



Figura 4. 7. Degradación del cohesivo del Modelo 4.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

4.4. MODOS DE DAÑO

Introducido el comportamiento del cohesivo dependiendo el modelo numérico que se trate, se puede deducir como se producirá la rotura de las fibras y la matriz frente al impacto, así como la geometría que pueda tener el área dañada del material compuesto.

Para la perforación en el límite balístico del Modelo 1 se obtiene una superficie de perforación de la geometría del proyectil (Figura 4.8). Como se ha explicado anteriormente, el cohesivo se degrada de forma circunferencial, por lo que cabe esperar que el daño que se produce sobre el material compuesto tenga una geometría parecida. Una vez el proyectil ha traspasado el laminado, éste recupera elásticamente la geometría inicial, pero se aprecia perfectamente el hueco que deja la esfera.

La perforación producida en el Modelo 3 (Figura 4.9), presenta notables diferencias respecto al Modelo 1, al principio se presenta una geometría de daño equivalente a la superficie del proyectil. Sin embargo, a medida que el proyectil va traspasando el laminado y se va recuperando elásticamente, se aprecian elementos lineales que rompen con la geometría circular propia del proyectil, dejando así hileras horizontales y esquinas en la región del impacto, que se deben a la orientación del laminado.

En el Modelo 4, el cual presenta un laminado unidireccional, se observa cómo se crea una grieta que se incrementa a medida que el proyectil traspasa el laminado (Figura 4.10). Las fibras están colocadas a 0° por lo que el proyectil rompe las fibras de forma perpendicular creando una apertura superior a la superficie del proyectil. Una vez el impactador atraviesa el laminado, el material compuesto se recupera hasta alcanzar el reposo y se observa la grieta prácticamente cerrada. Por otro lado se crean grietas en la misma dirección a la principal debido a la elongación del material, que termina rompiendo y creando grietas adyacentes.

En cuanto al Modelo 2 y el Modelo 5, presenta una geometría de daño similar al Modelo 1, debido a que tiene las mismas orientaciones de las láminas.

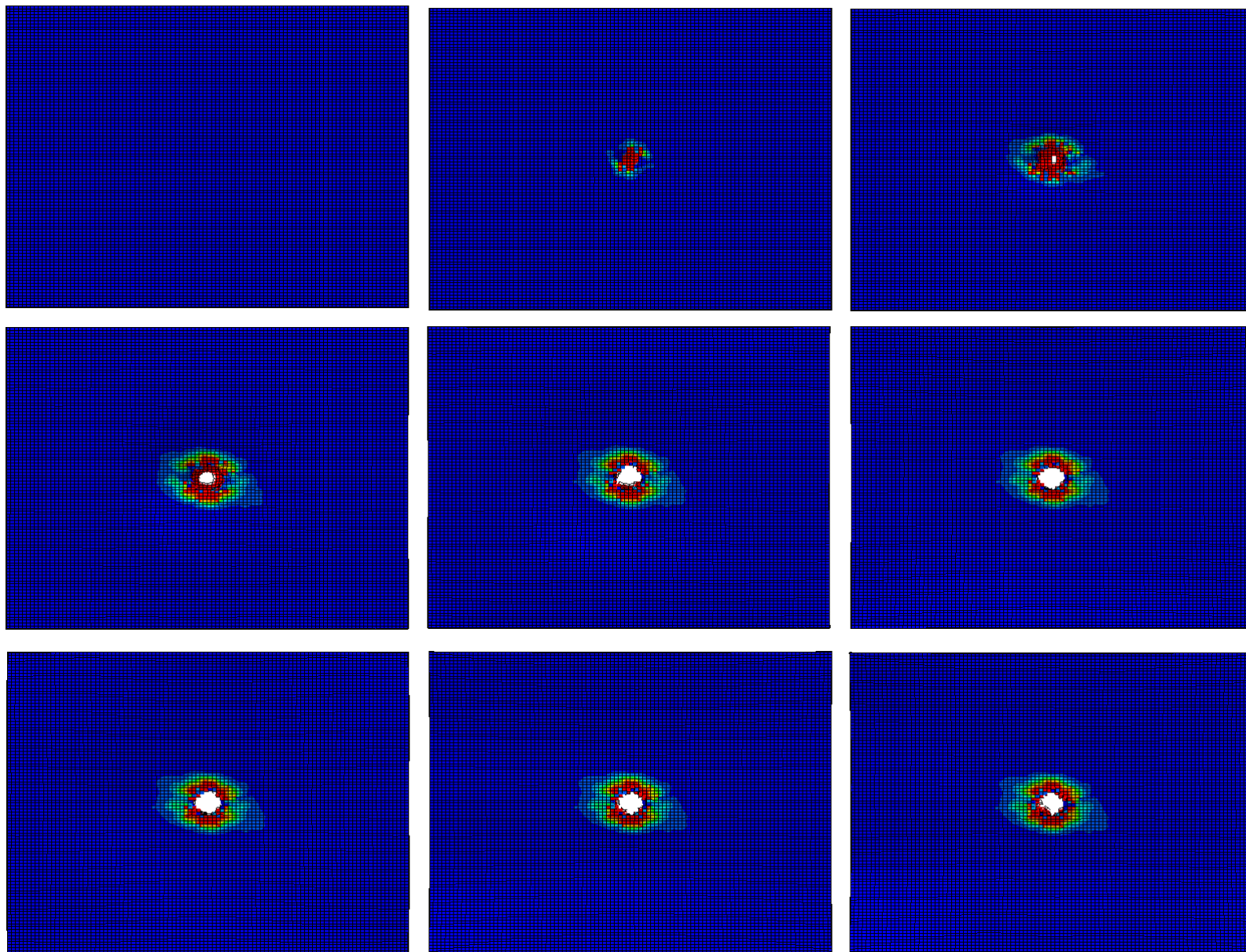


Figura 4. 8. Daño en el Modelo 1 a una velocidad de impacto de 267 m/s.

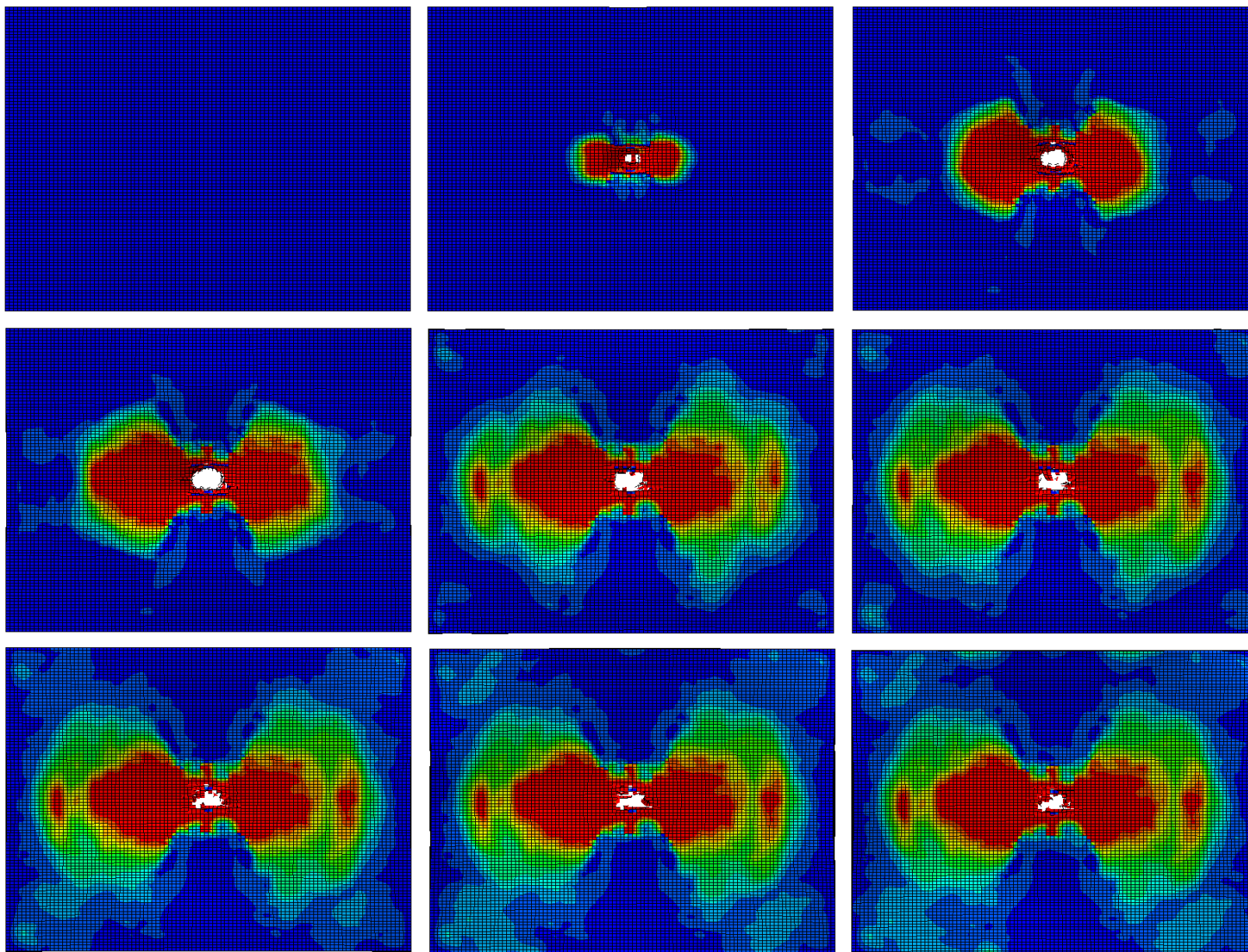


Figura 4. 9. Daño en el Modelo 3 a una velocidad de impacto de 311 m/s.

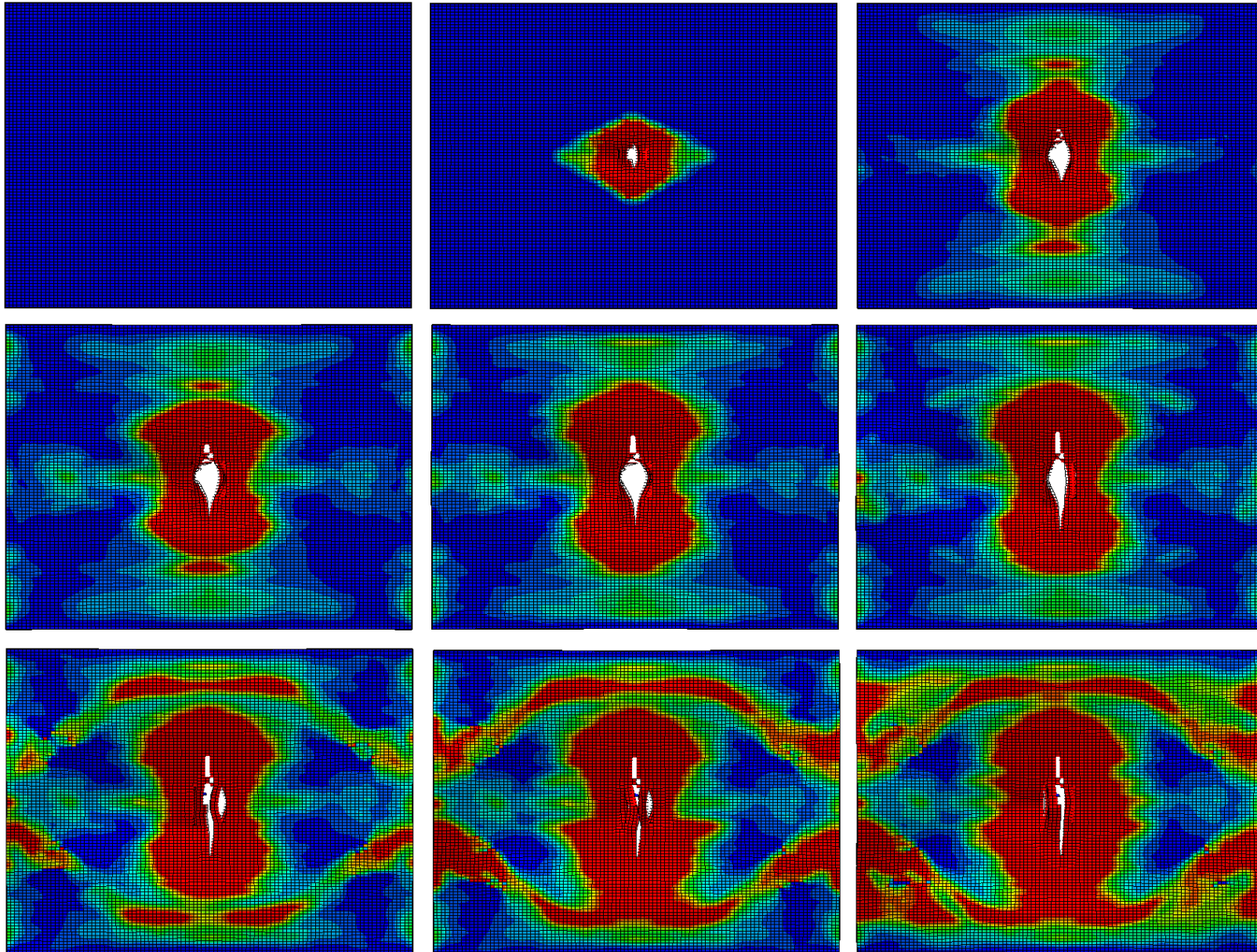



Figura 4. 10. Daño en el Modelo 4 a una velocidad de impacto de 300 m/s.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

Por otro lado, es interesante analizar la interacción producida entre el material cohesivo y el material compuesto. Cuando se produce el impacto, el material cohesivo se degrada llegando a perder la cohesión entre ambas placas y por lo tanto producir el despegue entre láminas. En el Modelo 1, Modelo 2, Modelo 4, Modelo 5 y el Modelo 6 el cohesivo permanece íntegro en los exteriores del mismo, sin producir un despegue de algunos de los lados de las placas del material compuesto (Figura 4.11).

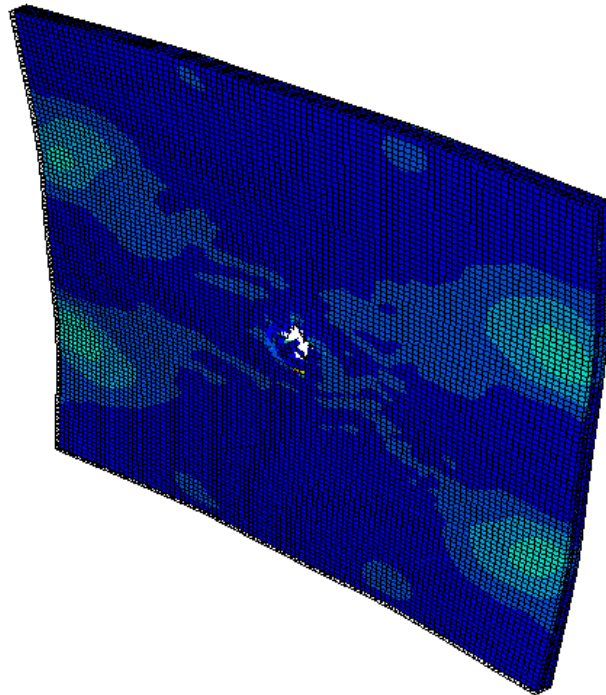


Figura 4. 11. Comportamiento a impacto del laminado del Modelo 1.

En cuanto al Modelo 3, se observa que el modelo cohesivo se degrada superando los límites y se produce el despegue entre las láminas de material compuesto (Figura 4.12).

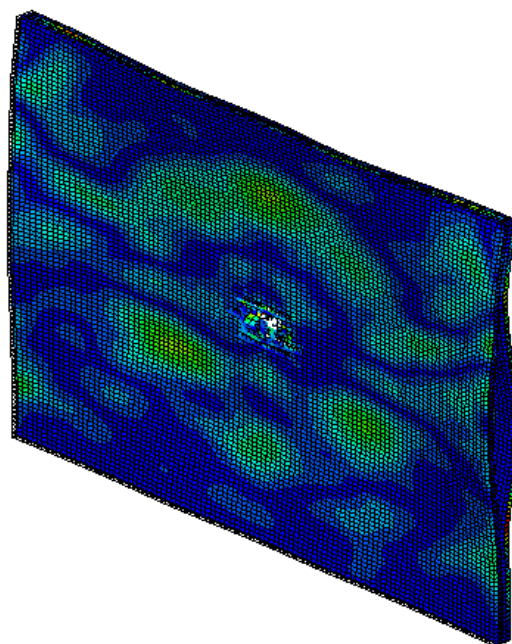



Figura 4. 12. Comportamiento a impacto del laminado del Modelo 3.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

4.5. ENERGÍA ABSORBIDA

Un factor importante a la hora de analizar los ensayos de impacto es la energía capaz de absorber el material (Figura 4.13).

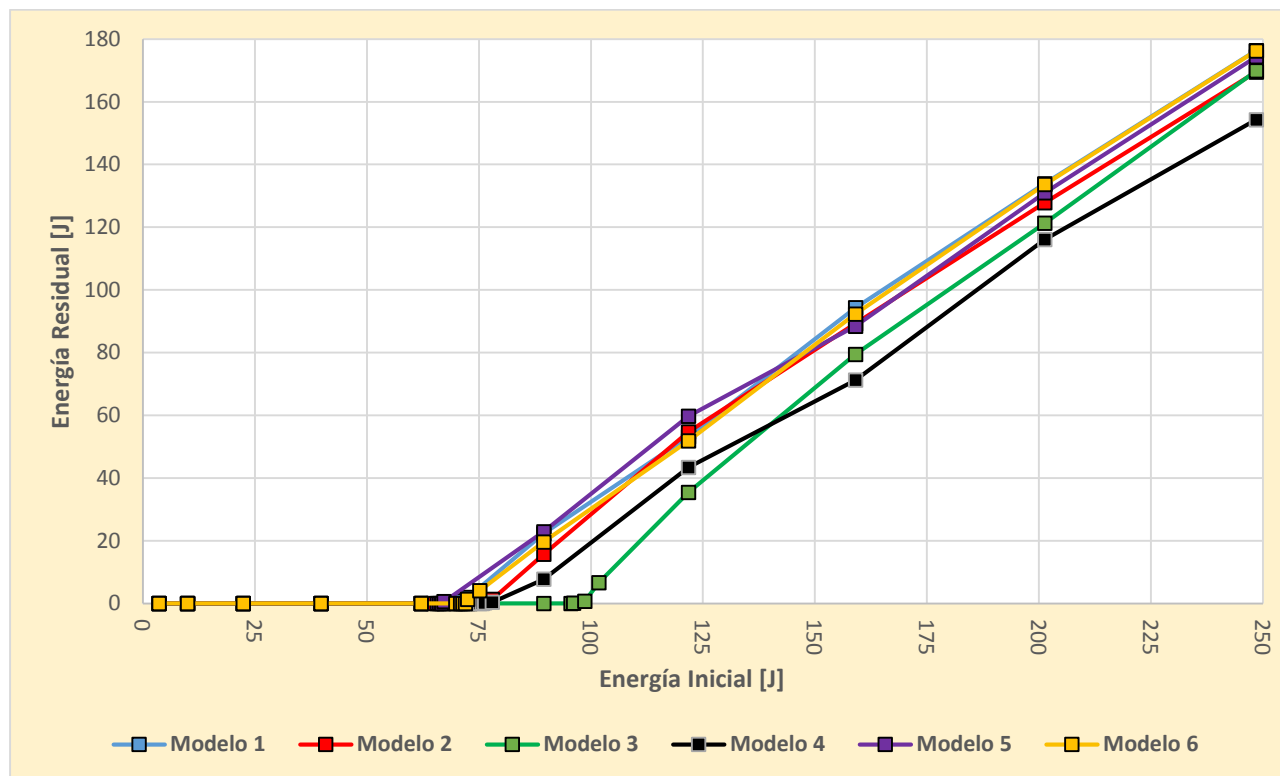


Figura 4. 13. Comparativa de las curvas Energía Residual - Energía Inicial de los modelos.

Como se puede observar el Modelo 1, el Modelo 2, el Modelo 5 y el Modelo 6 presentan un comportamiento energético similar, como ocurre en los anteriores apartados. Puesto que presenta un mayor daño de superficie para velocidades menores al resto de modelos, las curvas obtenidas se desplazan a la izquierda, y finalmente, alcanzan una energía residual superior, siendo menos efectivos que el Modelo 3 y el Modelo 4.

4.6. COMPARACIÓN CON MODELOS EXPERIMENTALES

No ha sido posible encontrar un ensayo experimental de un laminado de fibra de carbono con las mismas características que los modelos numéricos realizados en este trabajo. Lo más parecido que se ha encontrado es el trabajo realizado por López-Puente et al. [1], en cual realiza un impacto sobre un laminado AS4/8552 de espesor de 2,4 mm y con 6 láminas orientadas de la siguiente manera: $[(+45, -45, 0, 90, 90, 0)_s]$.

En cuanto a la curva Velocidad residual – Velocidad inicial del Modelo Experimental (Figura 4.14), presenta una forma similar a las mostradas en los modelos numéricos. El límite balístico obtenido en el Modelo Experimental es 120 m/s , la diferencia con el modelo numérico se produce por el espesor del laminado. Cabe destacar que el modelo numérico más parecido al experimental es el Modelo 1, por la orientación y apilamiento de las láminas.

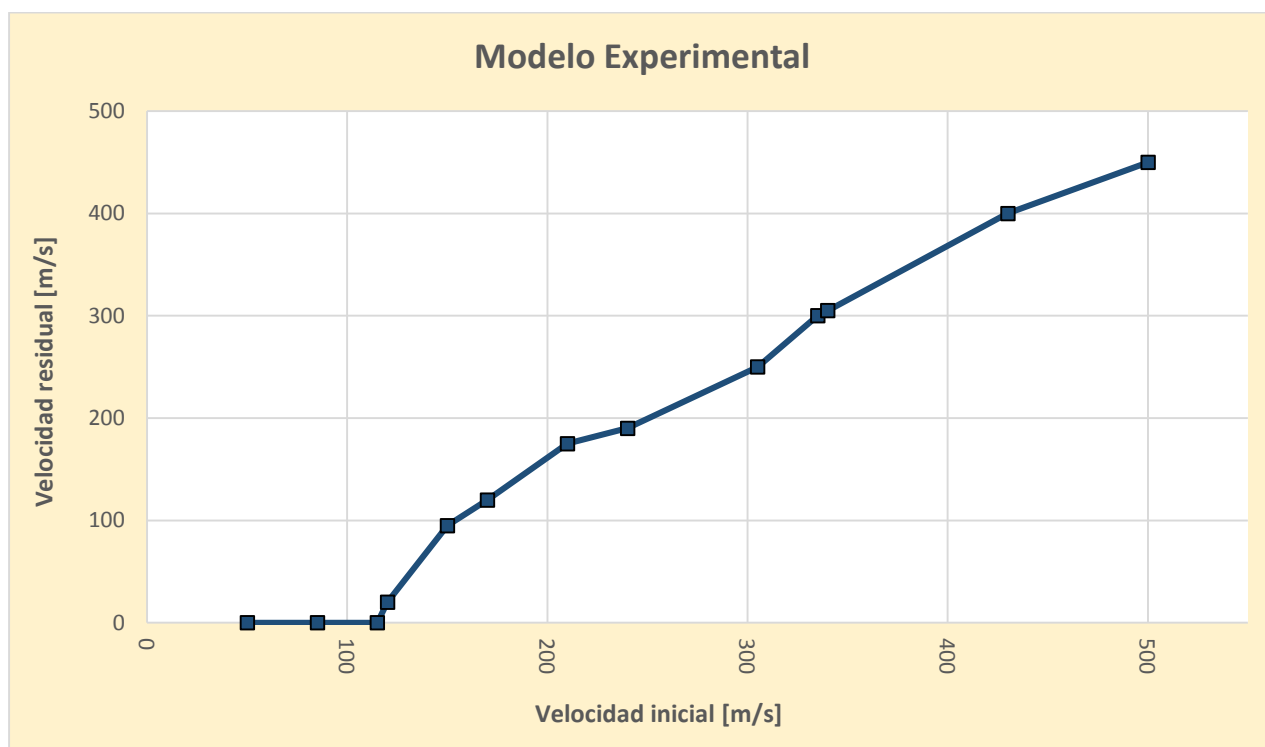


Figura 4. 14. Curva Velocidad Residual - Velocidad Inicial del Modelo Experimental.

Respecto al área dañada, los modelos numéricos presentan una curva semejante a la curva del Modelo Experimental en cuanto a la forma de la misma (Figura 4.15), pero no respecto a los valores numéricos los cuales se alejan bastante del experimental.

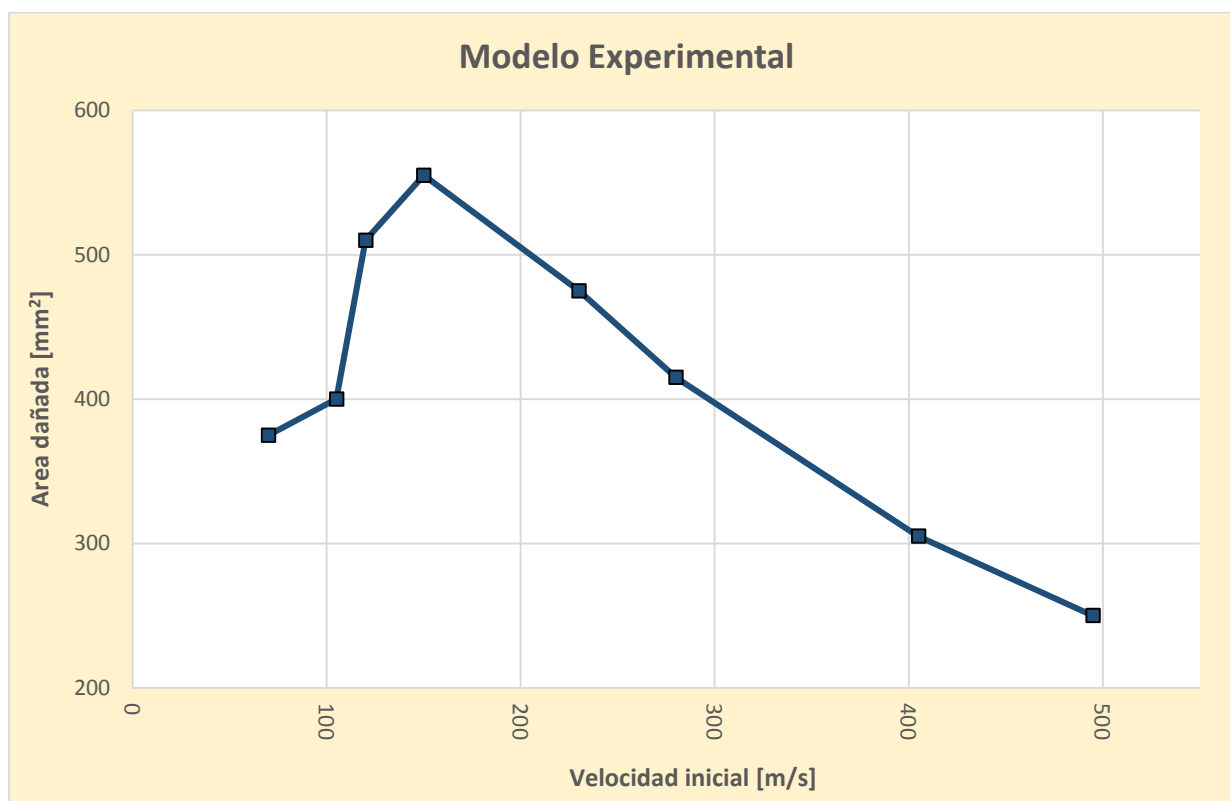



Figura 4. 15. Curva Área dañada – Velocidad Inicial del Modelo Experimental.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	RESULTADOS	

Como se ha comentado, los valores numéricos de la modelización no se aproximan a los resultados experimentales. Según el estudio de Mata Díaz [36] con un aumento de las interacciones cohesivas entre láminas de material compuesto se aproxima notablemente a los resultados experimentales. Es decir, para los modelos numéricos estudiados se tiene únicamente una placa de material cohesivo para 16 láminas de material compuesto, por lo tanto, para que los resultados de la modelización se aproximen a los experimentales sería necesario el uso de 15 placas de cohesivo (Figura 4.16).

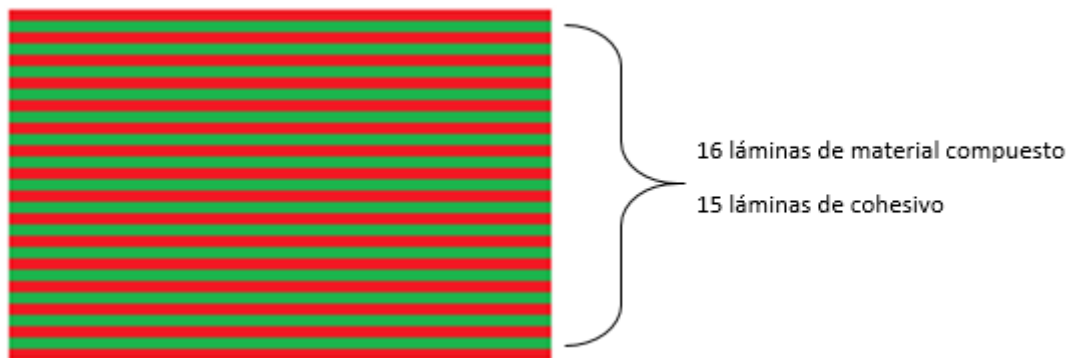
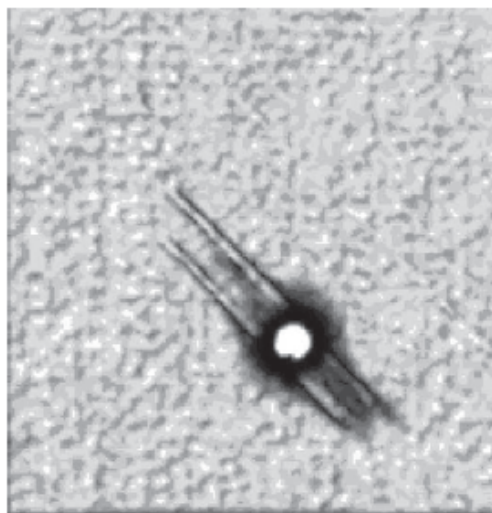


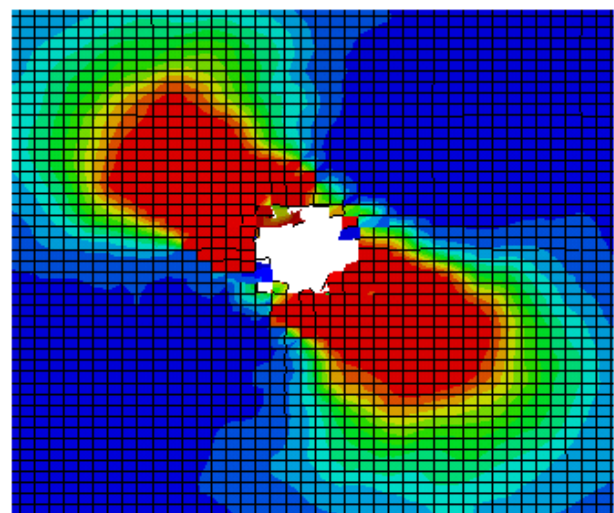
Figura 4. 16. Composición de la propuesta de laminado.

Como se puede observar, al igual que en los modelos numéricos el valor máximo del área dañada se produce alrededor de la velocidad del límite balístico, una vez alcanzado se produce una perforación limpia, reduciendo el área afectada notablemente.

En cuanto al modo de daño que se produce en el laminado, se asemeja en la forma de perforación de proyectil, ya que al tratarse de laminados con orientación de láminas iguales se produce un agujero con forma circular (Figura 4.17).



(a)



(b)

Figura 4. 17. Área dañada a 500 m /s.


a) Modelo Experimental

b) Modelo 1.

The page features a light blue background with abstract geometric shapes in various shades of blue at the top and bottom. A thin, dark blue line runs diagonally across the upper portion of the page.

CAPITULO 5

PRESUPUESTO

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	PRESUPUESTO	

5.1. PRESUPUESTO

En este apartado se exponen el presupuesto necesario para la realización de la modelización numérica presente en el trabajo. Por una parte se encuentran los gastos debido a material electrónico y equipos necesarios, y por otro lado está el coste producido por la mano de obra.

En cuanto al equipo utilizado, ha sido necesario un potente ordenador capaz de realizar cálculos con varios procesadores. El equipo utilizado se compone de 16 procesadores que permiten realizar cálculos en un tiempo reducido a un ordenador convencional. Además, ha sido necesario la contratación de la licencia de Abaqus de duración de 1 año. Esta licencia está limitada para el cálculo de un máximo de 250.000 nodos.

Por otro lado, es necesario la contratación y formación de un ingeniero. Se estima que para la realización de la modelización será necesario un total de 300 horas. El precio por hora del ingeniero es de 15 €/hora.

Por último, se deben de tener en cuenta una serie de gastos indirectos como el coste de luz, el mantenimiento y seguridad de los equipos, instalación, etc.

En la Tabla 5.1 se muestra el desglose del coste debido al presupuesto.


PRESUPUESTO		
Concepto	Duración	Precio
Equipo	-	5.000 €
Licencia	1 año	1.000 €
Personal	300 horas	4.500 €
Formación	200 horas	575 €
Gastos Indirectos	-	750 €
Total	3 meses	11.825 €

Tabla 5. 1. Presupuesto.

The page features a white background with blue geometric shapes at the top and bottom. These shapes consist of overlapping triangles and quadrilaterals in various shades of blue, creating a modern, abstract design. A thin, light blue line runs diagonally across the page, intersecting the geometric shapes.

CAPITULO 6

TRABAJO FUTURO Y CONCLUSIONES

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	TRABAJOS FUTUROS Y CONCLUSIONES	


6.1. TRABAJOS FUTUROS

La aplicación de materiales compuestos se ha extendido en las últimas décadas, resultando un avance para la industria aeronáutica y automoción. Pero su alto coste de producción resulta una barrera a la hora de expandirse y aplicarse en otras industrias. Abaratar los costes de obtención de laminados, facilitaría el uso de este tipo de materiales y el desarrollo del mismo.

En el *World Wide Failure Exercise* [29] se estableció que los modelos analíticos establecidos por varios autores discrepaban entre sí, y no se asemejaban perfectamente a la realidad. Establecer un modelo analítico universal, resultaría ventajoso a la hora de analizar el comportamiento del material, así como el modo de fallo.

Algunas propuestas interesantes que podrían ampliar el estudio establecido por este Trabajo Fin de Grado:

- Realizar diferentes comparaciones de laminados en función del espesor. Es evidente, que para espesores inferiores al estudiado la energía que absorbe el laminado será inferior, y por lo tanto se producirá la perforación a velocidades más bajas, obteniéndose velocidades residuales más altas. Pero establecer cómo se comporta el material en función del espesor podría ser determinante para aplicarse a diversas industrias o aplicaciones.
- Estudiar el impacto para diferentes tipos de proyectil, es decir, variando el diámetro o cambiando la geometría y masa, o incluso con proyectiles puntiagudos.
- Puesto que el trabajo se centra en el estudio de la orientación de las láminas, es posible realizar otras modelizaciones variando la orientación o el orden de apilamiento de las láminas, aunque como se ha podido comprobar no afecta considerablemente a los resultados.
- Se ha estudiado el comportamiento del material frente al daño según el modelo de Hashin implementado en Abaqus. Mediante la programación de una subrutina se podría estudiar diferentes modelos de comportamiento frente al daño.
- La mayoría de los impactos que se producen son en direcciones no perpendiculares al plano, es decir, el proyectil impacta sobre el laminado en una dirección oblicua. De todas formas, el impactador recorrería más espesor del laminado por lo que el estudio realizado de forma perpendicular resulta más restrictivo y en circunstancias de seguridad es correcto.
- Realizar un modelo donde haya una placa de material cohesivo por cada lámina de material compuesto, es decir, en el caso estudiado se tienen 16 láminas de material compuesto por lo que habría que modelizar el laminado con 15 placas de cohesivo.
- Por último, apoyar y validar los modelos numéricos mediante resultados experimentales.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	TRABAJOS FUTUROS Y CONCLUSIONES	

6.2. CONCLUSIONES


La finalidad de este Trabajo Fin de Grado es la de estudiar el comportamiento del laminado de material compuesto dependiendo de la orientación de las láminas que lo componen. Por lo tanto se puede afirmar lo siguiente:

- Para laminados cuasi-isótropos el material se comporta de la misma manera, es decir, se tienen valores del límite balístico y de la velocidad residual semejantes. Se comprobó que el laminado ortótropo, con fibras dispuestas a 0° y 90° , presenta un límite balístico superior a los demás modelos. El modelo unidireccional tiene un límite balístico intermedio entre los modelos, pero presenta un mejor comportamiento para velocidades altas obteniendo menor velocidad residual.
- El área máxima dañada se produce para velocidades próximas al límite balístico. Una vez el material perfora el laminado el área dañada se reduce a medida que aumenta la velocidad inicial de impacto. El motivo por el cual un modelo presente mayor superficie dañada que otro, se intuye que se debe a la orientación y apilamiento de fibras.
- Se ha observado cómo se deforma el laminado durante un impacto. El daño que se produce sobre los modelos cuasi-isótropos es de forma circunferencial (Figura 4.8), dejando la forma geométrica del proyectil después de perforar el laminado. Sin embargo, el modelo ortótropo se observa que el daño se produce en dirección a las fibras, y una vez perforado el proyectil no se aprecia una geometría clara, es decir, quedan zonas con material desigual. Por último, el modelo unidireccional presenta una brecha perpendicular a la dirección de las fibras.
- La energía absorbida en el impacto por el laminado, es superior en los modelos ortótropo y unidireccional, que al tener la mayoría de las fibras dispuestas en la misma dirección soportan mejor los esfuerzos a los que están sometidos en el impacto perpendicular. Al contrario ocurre con los modelos cuasi-isótropos en los que más diversidad en la orientación de las fibras, en las que unas trabajan mejor que otras.
- Para validar los resultados se ha realizado una comparación con el trabajo de López-Puente et al. [1], y se ha concluido que los resultados experimentales varían respecto a la modelización debido al espesor del laminado. Pero las gráficas obtenidas del límite balístico y el área dañada, así como la forma de perforación, son similares en cuanto a la forma.




ANEXOS



Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	


Anexo 1. Velocidad residual del Modelo 1.

MODELO 1	
VELOCIDAD INICIAL	VELOCIDAD RESIDUAL ABSOLUTA
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
260	0
265	0
266	0
267	30,404
270	43,4568
300	149,61
350	231,32
400	307,978
450	366,954
500	421,151

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	


Anexo 2. Velocidad residual del Modelo 2.

MODELO 2	
VELOCIDAD INICIAL [m/s]	VELOCIDAD RESIDUAL [m/s]
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
255	0
260	0
270	0
271	0
272	19,79
273	25,69
275	29,23
280	36,16
300	125,49
350	234,64
400	299,58
450	358,54
500	412,94

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	


Anexo 3. Velocidad residual del Modelo 3.

MODELO 3	
VELOCIDAD INICIAL [m/s]	VELOCIDAD RESIDUAL [m/s]
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
300	0
310	0
311	10,45
315	26,489
320	81,65
350	188,74
400	282,65
450	349,22
500	413,34

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	


Anexo 4. Velocidad residual del Modelo 4.

MODELO 4	
VELOCIDAD INICIAL [m/s]	VELOCIDAD RESIDUAL [m/s]
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
270	0
275	0
276	0
277	12,89
280	18,46
300	88,14
350	208,92
400	267,63
450	341,67
500	393,95

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	

Anexo 5. Velocidad residual del Modelo 5.

MODELO 5	
VELOCIDAD INICIAL [m/s]	VELOCIDAD RESIDUAL [m/s]
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
257	0
258	0
259	2,09
260	24,32
300	151,69
350	245,12
400	298,25
450	362,92
500	418,8

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	ANEXOS	


Anexo 6. Velocidad residual del Modelo 6.

MODELO 6	
VELOCIDAD INICIAL [m/s]	VELOCIDAD RESIDUAL [m/s]
60	0
100	0
150	0
200	0
250	0
265	0
267	0
268	0
269	0
270	35,62
275	63,74
300	140,4
350	228,44
400	304,74
450	366,64
500	421,03




REFERENCIAS




Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	REFERENCIAS	

- [1] López-Puente, J., Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J.A., Zahr, J., Varas, J., “Numerical analysis of high velocity impacts on unidirectional laminates”, *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 629-634, 2014.
- [2] Dassault Simulia, “Abaqus Documentation 6.14”.
- [3] Pérez Martínez, M.A., “Evaluación del daño por impacto en laminados de material compuesto mediante la respuesta dinámica”, Tesis Doctoral, 2011.
- [4] Miravete, A., *Materiales compuestos*, Cambridge University, Zaragoza, España, 2000.
- [5] Stupenengo, F., *Materiales y materias primas: Materiales compuestos*, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Buenos Aires, República Argentina, 2011.
- [6] García Castillo, S.K., “Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto”, Tesis Doctoral, 2007.
- [7] Hull, D., *Materiales Compuestos*, Ediciones Reverte S. A., 1987.
- [8] Besednjak, A., *Materiales Compuestos*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005
- [9] Cantwell, W.J., Morton, J., “Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP”, *Composite*, Vol. 20, pp. 545-551, 1989.
- [10] Hosseinzadeh, R., Sholrieh, M.M., Lessard, L., “Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts”, *Composites, Science and Technology*, Vol. 66, pp. 61-68, 2006.
- [11] Richardson, M.O.W., Wisheart, M.J., “Review of low-velocity impact properties of composite materials”. *Composite Part A*, Vol. 27, pp. 1123-1131, 1996.
- [12] Buitrago Perez, B.L., “Comportamiento de estructuras de material compuesto sometidas a cargas impulsivas”, Tesis Doctoral, 2012.
- [13] Wen, H.M., “Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes”, *Composite Structures*, Vol. 49, pp. 312-329, 2000.
- [14] Taylor, W.J., Vinson, J.R., “Modelling ballistic impact into flexible materials”, *AIAA Journal*, Vol. 28, pp. 2098-2103, 1990.
- [15] Gu, B., “Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile”, *Composites: Part B*, Vol. 34, pp. 361-371, 2003.
- [16] Naik, N.K., Doshi, A.V., “Ballistic impact behavior of thick composite: Analytical formulation”, *AIAA Journal*, Vol. 43, pp. 1525-1536, 2005.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	REFERENCIAS	

- [17] Navarro, C., "Simplified modeling of the ballistic behavior of fabrics and fibre-reinforced polymeric matrix composites", *Engineering Materials*, Vol. 141, pp. 383-399, 1998.
- [18] López-Puente, J., Zaera, R., Navarro, C., "An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates", *International of Journal of Soli and Structures*, Vol. 44, pp. 2837-2851, 2007.
- [19] López-Puente, J., Zaera, R., Navarro, C., "High energy impact in woven laminates", *Journal de Physique IV*, Vol. 110, pp. 639-644, 2003.
- [20] Hashin, Z., Rotem, A., "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials", *Technical report, Department of materials engineering: Technion – Israel institute of technology*, Vol. 7, pp. 448-464, 1973.
- [21] Hou, J., Petrinic, N., Ruiz, C., "A delamination criterion for laminated composites under low-velocity impact", *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 2069-2074, 2001.
- [22] Martinez, X., Oller, S., Rastellini, F., Barbat, A.H., "A numerical procedure simulating RC structures reinforced with FRP using the serial/parallel mixing theory", *Computers & Structures*, Vol. 86, pp. 1604-1618, 2008.
- [23] Martinez, X., Rastellini, F., Oller, S., Flores, F., Oñate, E., "Computationally optimized formulation for the simulation of composite materials and delamination failures", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, pp. 134-144, 2011.
- [24] Puck, A., Schurmann, H., "Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1633-1662, 2002.
- [25] López-Puente, J., Zaera, R., Navarro, C., "Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, pp. 374-387, 2008.
- [26] World Wide Failure Exercise, *Composite Science and Technology*, Vol. 58, 1998, Vol. 62, 2002, Vol. 64, 2004.
- [27] Chang, F.K., Chang, K.Y., "A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations", *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 834-855, 1987.
- [28] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fiber composites", *Journal Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 329-334, 1980.
- [29] Tsai, S.W., "Strength characteristics of composite materials", *NASA CR-224, Nat. Aeronautics and Space Administration Contractor Report*, 1965.

Trabajo Fin de Grado	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SECUENCIA DE APILAMIENTO EN EL IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD DE CFRPS	 Universidad Carlos III de Madrid
Jesús Pavón de la Torre	REFERENCIAS	

- [30] Tsai, S.W., Wu, E.M., "A general theory of Strength for anisotropic materials", *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, pp. 58-80, 1971.
- [31] Abrate, S., "Impact on laminated composites: recent advances", *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 47, pp. 517-545, 1994.
- [32] Mi, Y., Crisfield, M.A., Davies, G.A.O., Hellweg, H.B., "Progressive delamination using interface elements", *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, pp. 1246-1272, 1998.
- [33] Needleman, A., "A continuum model for void nucleation by inclusion debonding", *Journal of Applied Mechanics*, Vol 54, pp. 525-531, 1987.
- [34] Tvergaard, V., Hutchinson, J.W., "The influence of plasticity on mixed mode interface toughness", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, pp. 1119-1135, 1993.
- [35] Cui, W., Wisnom, M.R., "A combined stress based and fracture mechanics based model for predicting delamination in composites", *Composites*, Vol. 24, pp. 467-474, 1993.
- [36] Mata Díaz, A., "Análisis del impacto de un proyectil esférico sobre un laminado cinta", Trabajo Fin de Master, Octubre 2013.
- [37] Reboul Corpa, J., "Modelización numérica del comportamiento de un material compuesto de tejido de fibra de carbono y matriz epoxi ante cargas dinámicas", Trabajo 'Fin de Grado, 2012.
- [38] Universidad Carlos III de Madrid, "Capítulo 1: Introducción a los materiales compuestos".
- <<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo1.pdf/view>> [Consulta: Agosto de 2015]
- [39] Sumiglas S.A., "Fibras".
- <<http://www.plastiquimica.cl/pdf/Fibras.pdf>> [Consulta: Junio de 2015]